

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
E. T. S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

**SISTEMA SENSORIAL PARA CONTROL Y
LOCALIZACION DE VEHÍCULOS EN EXTERIORES**

TESIS DOCTORAL

por

Ana Pozo Ruz
Ingeniera Industrial por la Universidad de Málaga

Málaga, mayo de 2001

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
E. T. S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

**SISTEMA SENSORIAL PARA CONTROL Y
LOCALIZACION DE VEHÍCULOS EN EXTERIORES**

TESIS DOCTORAL

Autora:
Ana Pozo Ruz

Directores:
Prof. Dr. D. Domingo Guinea Díaz
Instituto de Automática Industrial.
Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
Arganda del Rey (Madrid)

Prof. Dr. D. Francisco Sandoval Hernández
Dpto. de Tecnología Electrónica.
Universidad de Málaga.

Málaga, mayo de 2001

*Hay en el mundo un lenguaje que todos comprenden.
Es el lenguaje del entusiasmo,
de las cosas hechas con amor y voluntad,
en busca de algo que se desea o en lo que se cree.*

Paulo Coelho (*El Alquimista*)

A todas las personas que me han ayudado y acompañado a lo largo de este trabajo,
en especial a mis padres, a mi hermana Elena, a Fernando y a Noemi.
Muchísimas gracias por vuestro cariño, apoyo, ánimo y constancia.

Agradecimientos

El trabajo de esta tesis no es simplemente un conjunto de ideas que han ido tomando forma y consistencia con el tiempo. Es el esfuerzo profesional de muchos y el apoyo, el empuje y el cariño de otros lo que la han hecho posible.

Por ello, en primer lugar quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres y a mi hermana Elena, por su eterno cariño y comprensión, y por haberme demostrado siempre apoyo incondicional e infinita confianza en todas mis decisiones.

A mis directores, el Dr. D. Domingo Guinea Díaz del Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de Madrid y el Dr. D. Francisco Sandoval Hernández del Dpto. de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga. Quiero agradecerles su confianza, su ayuda y sus ánimos.

Al Dr. D. Salvador Ros, director del Instituto de Automática Industrial del CSIC, mi gratitud más sincera por la acogida que he tenido en el Instituto y por el continuo interés que ha mostrado en este trabajo.

A todas las personas del Dpto. de Sistemas del Instituto de Automática Industrial del CSIC, con quienes he tenido la enorme satisfacción de trabajar intensamente, convirtiendo en muchos casos una relación profesional en una buena amistad. A la Dra. Dña. María C. García-Alegre y a la Dra. Dña. Ángela Ribeiro, quiero agradecerles su confianza, interés y ayuda profesional. A Dña. Lía García Pérez y D. Rubén Martínez Rioja, por las incontables horas que hemos pasado trabajando sobre el tractor, ya sea en el interior de la nave o en el campo, por todos los momentos de *desesperación* y, cómo no, de satisfacciones que hemos compartido y, sobre todo, por tomaros las cosas con tan buen humor. A Dña. Montserrat Parrilla Romero, por sus claras explicaciones acerca de Builder C++ y por darme siempre ánimos. A D. Hugo Fernández Sánchez, por estar dispuesto siempre a echarnos una mano y por todas las veces que nos la ha echado. Al Dr. D. Luis Gómez-Ullate, por sus charlas, por hacerme ver las cosas desde otro punto de vista y, sobre todo, por animarme en todo momento. A D. Eugenio Villanueva, por solucionarnos tantos problemas mecánicos y por responder siempre tan amablemente a mis muchas consultas. Al Dr. D. José Javier Anaya, por su valiosa ayuda en temas relacionados con la tarjeta de adquisición de datos. A todos los miembros de la comunidad *ping* por vuestros ánimos y por los buenísimos ratos que hemos pasado juntos.

De forma muy especial quiero expresar mi más sincero agradecimiento a dos personas muy cercanas que siempre han estado a mi lado, ayudándome y animándome, haciéndome el camino mucho más llano. A la Dra. Dña. Noemi Jiménez Redondo, por su estrecha y constante amistad,

su incondicional apoyo, sus consejos, su confianza, por tantas veces que me ha facilitado mi venida a Madrid y, sobre todo, por contar siempre conmigo. A D. Ernesto Rivas Montoya, por su ayuda en tantas gestiones, instalaciones de programas, equipos, etc., y su simpatía y optimismo.

Al Dr. D. Alfonso García Cerezo y al Dr. D. Jorge Luis Martínez Rodríguez, del Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, les quiero agradecer el haberme iniciado en la investigación acerca de los robots móviles de exteriores y su tiempo y ayuda en los años que trabajé en el grupo de Robótica Móvil de este departamento.

Al Dr. Hubert Roth y al Dr. Klaus Shilling, del *Institute for Applied Research* por integrarme en su grupo de investigación en robots móviles durante mi estancia en la *Fachhochschule Ravensburg-Weingarten* (Alemania) en los meses de julio a septiembre de 1997.

Al Dr. D. Luis Alfonso Jurado, director de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Mayor de San Andrés (La Paz, Bolivia) y al Dr. D. Gustavo Hernández del Forn, rector de la Universidad Privada Franz Tamayo (La Paz, Bolivia), por su extraordinaria hospitalidad durante las dos ocasiones que tuve la oportunidad de visitar su país. A D. Roberto Villegas, de ElectroPaz (La Paz, Bolivia), por su amistad, su acogida y por animarme en todo momento. A todos mis amigos de Bolivia, en especial a D. Edgar Bustos y D. Huáscar Espinoza, y a mis buenos amigos españoles Dña. M. Teresa Sirera, Dr. D. José Molina, Dña. Ivana Arnal y D. Ignacio Corral, que compartieron conmigo experiencias inolvidables en aquel país.

A mis compañeros de Dpto. D. Pedro Sotorrío, D. Eduardo Pérez y Dña. Carmen García Berdonés, por facilitarme las cosas cuando estaba en Madrid y por sus ánimos.

A Blanca, Carolina, Elena, Eu, Israel, Jorge, Macarena, M. Ángeles, M. José y Olga. Les quiero agradecer el compartir conmigo otras ilusiones y proyectos y el tenerme siempre presente a pesar de mis ausencias.

A D. Fernando Alonso y Dña. Cayetana Utrera, por su gran amistad y por estar siempre a mi lado.

A Dña. Marianela Moreno y Dña. M. José Bernal, mis compañeras de piso de Madrid, quiero agradecerles sus ánimos y apoyo.

A mis alumnos, por interesarse y preguntarme por los pasillos *cómo llevo mis líos* y por sus ánimos.

A la Fundación Ramón Areces, por la beca de Investigación para la realización de Tesis Doctoral en el área de la Ingeniería que disfruté durante los años 1997-1998, y que posibilitó el comien-

zo de este trabajo. A los proyectos de investigación *Arquitectura Multiagente: generación de comportamiento complejo para un robot de pulverización en exteriores (CICYT TAP98-0781)* y *Sistema de Exploración Autónomo basado en Visión Foveal y Activa (CICYT TIC98-0562)* por el soporte recibido. Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Málaga, por la subvención recibida para la realización de estancias en el extranjero y asistencia a congresos.

Resumen

Esta tesis se ocupa de la resolución del problema de posicionamiento y localización de un vehículo en un entorno natural. La determinación de la posición de un vehículo en ambientes naturales es un problema complejo de resolver, debido a la ausencia de referencias en espacios abiertos, a la gran variedad de situaciones e interacciones que pueden presentarse en el entorno de trabajo y a la imprecisión de los dispositivos sensoriales y de control.

Los planteamientos encontrados en la literatura para la determinación de la posición de robots móviles se dividen, de forma general, en sensores internos y externos. Los primeros proporcionan de forma continua e inmediata la localización del robot sin conocimiento alguno del entorno. Sin embargo, no pueden emplearse como único sistema de posicionamiento pues, al tratarse de sensores relativos, el error que cometen en la estimación crece con el movimiento del vehículo.

Los sensores externos o absolutos basan sus medidas en las relaciones del vehículo con elementos externos como balizas, marcas o satélites. Entre ellos, para la localización de vehículos en exteriores, destaca el sistema de posicionamiento global mediante satélites (sistema GPS). Entre las bondades del GPS se encuentran su capacidad para proporcionar posiciones las 24 horas del día, sin coste de uso y de forma instantánea, no requiere modificar el entorno de trabajo y, al ser un sistema de posicionamiento global, el error asociado a las medidas no crece ni con el tiempo ni con la distancia recorrida por el vehículo. Para obtener precisiones por debajo de 5 m. se requiere emplear técnicas diferenciales. La precisión requerida para el sistema determinará el coste del mismo.

Sin embargo, a pesar de utilizar GPS diferenciales muy precisos, situaciones muy comunes en cualquier tarea de navegación en exteriores dejan inhabilitado al sistema o bien reducen considerablemente su potencial: apantallamiento de la señal por obstáculos como árboles, edificios o bien interferencias con tendidos eléctricos.

Se justifica, por tanto, la necesidad de un sistema multisensorial para conseguir los requisitos de continuidad, disponibilidad y robustez necesarios en todo sistema de posicionamiento. En esta tesis se discuten las ventajas e inconvenientes de diferentes alternativas a utilizar como sistema

sensorial para la localización en exteriores, para optar por la implantación de un sistema sensorial que, empleando un mínimo número de sensores complementarios y redundantes, en concreto un odómetro como sensor interno y un GPS diferencial como sensor externo y herramienta principal de posicionamiento, permitan localizar al robot móvil en un entorno de exteriores de forma continua, robusta y en tiempo real.

Como técnica diferencial se ha empleado el sistema Omnistar, que envía las correcciones diferenciales en código a través de un satélite geostacionario consiguiendo una precisión algo menor al metro en el 95% de los casos.

Para combinar la información que sobre la posición ofrecen los sensores a bordo del robot, se ha formulado un modelo de fusión probabilístico que, partiendo de las estimaciones con incertidumbre proporcionada por el GPS diferencial y por el odómetro, permite obtener la mejor estimación de la magnitud medida y la incertidumbre asociada a esta mejor estimación. Se consigue así un posicionamiento continuo y preciso aún en ausencia de señal GPS. La técnica de fusión sensorial que se propone en esta tesis distingue la naturaleza del error asociado a las medidas de los sensores: ruido blanco y coloreado o autocorrelacionado, y la existencia o no de correlación entre las mismas.

Se han validado experimentalmente con éxito los desarrollos presentados en el robot tractor ROJO, un tractor comercial cuya automatización forma parte del trabajo desarrollado en esta tesis. Se demuestra la eficacia del método de fusión sensorial propuesto aun empleando sensores de coste medio/bajo y en situaciones en que la señal GPS, herramienta principal de posición, no está presente.

Abstract

This thesis deals with the solution of the position and location of a vehicle in a natural environment. The determination of the position of the vehicle in a natural environment is a complex problem because of the variety of possible situations and interactions present in the work space, in addition to the imprecision in the sensors and actuators, and the failure of the algorithms used for taking decisions and control.

The problem of self-location has received considerable attention and many techniques have been proposed to solve it. In general, the knowledge of the position can be achieved by two distinct methods: dead reckoning and absolute reckoning. Dead reckoning continuously provides location data with no delay and without any knowledge of the environment. Although dead reckoning involves a simple, inexpensive and easy to compute solution in real time, it can not be used as a unique method for attaining a precise position of the vehicle during a large period of time. The reason is that the rough of the ground and the travelled distance produce a high accumulated error.

Absolute positioning methods usually rely on navigation beacons, active or passive landmarks or satellite-based navigation. Among them, the global positioning system (GPS) is extraordinarily useful in tasks such the location of the vehicle in outdoor navigation. Thus, GPS provides positions 24 hours per day, in real time and without any cost. The location of the vehicle is calculated by triangulation techniques using a group of satellites in the space as beacons, so it is not required to modify the work space. The error in position is bounded and does not depend on the distance travelled by the vehicle. However, differential GPS techniques (DGPS) should be used to achieved precisions under 5 meters. The precision required for the system will determine its cost.

Nevertheless, frequent events may leave the system useless because of the lack of information. This situations can happen when an obstacle (like trees, buildings o even electrical interferences) blocks the signal from satellites. Such situations affect equally to high and low precision DGPS.

For these reasons, it can not be possible to obtain a precise position estimation using an unique

type of sensor and, in most cases, to guarantee a safe navigation, it is adequate to use estimations from different kind of sensors. In this thesis, advantages and disadvantages of different options to build a sensorial system for outdoor location are discussed. Among them, a sensorial system composed by a minimum number of complementary and redundant sensors (an odometer as internal sensor and a DGPS as external sensor and main tool of positioning) has been chosen in order to provide the location of the vehicle in a continuous, robust and real time manner.

As differential technique, Omnistar system has been used, that sends differential corrections through a geostationary satellite, providing submeter precision in the 95% of cases.

In order to combine the information provided by the different sensors in the vehicle, a fusion probabilistic model has been formulated. This algorithm provides not only the best estimation of the vehicle position but also the uncertainty associated to this estimation. Therefore, a continuous and precise positioning is available even when the GPS signal is not present. The technique proposed in this thesis distinguishes the nature of the error associated to the sensorial measurements: white noise and coloured noise, and the existence of correlation between them.

The proposed positioning method has been successfully performed with the ROJO mobile robot, a low cost commercial lawnmower whose automation is part of the work developed in this thesis.

Índice General

1	Introducción	1
1.1	Objetivos de la tesis	4
1.2	Organización de la tesis	6
2	La robótica móvil en exteriores	9
2.1	Introducción	9
2.2	Evolución hacia la robótica móvil	9
2.3	La robótica móvil: hacia los sistemas autónomos	11
2.4	Revisión de los métodos para la estimación de la posición de un robot móvil	15
2.4.1	Estimación explícita de la posición	16
2.4.2	Estimadores basados en la percepción del entorno	20
2.4.3	Sistema sensorial para el posicionamiento en exteriores	22
2.5	Aplicaciones de la robótica móvil en exteriores	23
2.6	Recapitulación	34
3	GPS: Sistema de posicionamiento global mediante satélites	37
3.1	Introducción	37
3.2	El sistema GPS	38
3.2.1	Antecedentes del GPS	38
3.2.2	Arquitectura del GPS	39

3.2.3	Principios de funcionamiento del GPS	42
3.2.4	Cadenas de código y niveles de servicio GPS	46
3.2.5	Fuentes de error en los GPS	48
3.2.6	Cuantificación de la incertidumbre en la localización GPS	52
3.2.7	Técnicas de empleo del sistema GPS	52
3.2.8	Algunas aplicaciones de los GPS	58
3.2.9	Futuro del sistema GPS	60
3.3	Estudio del GPS para la localización del vehículos autónomos	64
3.3.1	Sistema RTK	66
3.3.2	Sistema Omnistar	67
3.3.3	Sistema RASANT	69
3.3.4	Experimentación	71
3.4	Recapitulación	75
4	El robot tractor ROJO	77
4.1	Introducción	77
4.2	Sistema de actuación del robot ROJO	80
4.3	Sistema sensorial para la localización en el robot Rojo	86
4.3.1	Sensores odométricos	87
4.3.2	Selección del receptor GPS para un tractor autónomo	90
4.4	Arquitectura de control en el robot tractor ROJO	92
4.4.1	Programa servidor	96
4.4.2	Programa cliente	99
4.5	Modelo cinemático del vehículo	103
4.5.1	Sistema de coordenadas	105
4.5.2	Movimiento de la bicicleta	107

4.5.3	Aplicación del modelo de la bicicleta al robot ROJO	111
4.6	Recapitulación	115
5	Localización precisa en exteriores	117
5.1	Introducción	117
5.2	Estimación de la incertidumbre espacial	119
5.2.1	Transformación aproximada	120
5.3	Fusión de medidas sensoriales	123
5.3.1	Caso 1: Ruido blanco y no correlacionado	129
5.3.2	Caso 2: Ruido blanco correlacionado	134
5.3.3	Caso 3: Ruido coloreado y no correlacionado entre sí	139
5.3.4	Caso 4: Ruido coloreado y correlacionado	141
5.4	Sistema de calibración sensorial. Análisis de ruido	144
5.4.1	Corrección de los errores sistemáticos y cálculo de la matriz de covarianza	145
5.4.2	Matriz de covarianza y caracterización del error del GPS	150
5.5	Algoritmo de fusión sensorial particularizado al robot ROJO	154
5.6	Diseño del agente VE A PUNTO	161
5.6.1	Descripción y modelado del campo de experimentación ZOCO	162
5.6.2	Cálculo del grafo	164
5.6.3	Seguimiento de caminos	171
5.7	Resultados experimentales	174
5.7.1	Estudio de la fusión sensorial de odometría y GPS	175
5.7.2	Validación del agente VE A PUNTO	180
5.8	Recapitulación	184
6	Conclusiones y líneas de futuros desarrollos	187

6.1	Conclusiones	187
6.2	Sugerencias para futuros trabajos	189
A	Descripción de los receptores GPS y mensajes NMEA empleados	191
A.1	El receptor GPS GN-74	191
A.2	El receptor GPS G8	192
A.3	El receptor GPS Z12	193
A.4	El receptor GPS ACEII	195
A.5	El receptor GPS 3100LR12	196
A.6	El receptor GPS MS750	197
A.7	El protocolo NMEA 0183	198
A.7.1	Mensajes NMEA 0183 aplicados al GPS	199
B	El sistema GPS en posicionamiento autónomo	205
B.1	Sistema GPS en modo absoluto en presencia de la S/A	205
B.1.1	Experimentos en estático	207
B.1.2	Experimentos en movimiento	221
B.2	Sistema GPS en modo absoluto en ausencia de la S/A	222
C	Sistemas de coordenadas para posiciones GPS	225
C.1	Sistema de coordenadas: longitud, latitud y altitud	226
C.2	Sistema de coordenadas UTM	227
D	Arquitectura cliente-servidor en el robot ROJO	231
D.1	Programa servidor	231
D.1.1	Ciclo de atención a los clientes	231
D.1.2	Ciclo de lectura de la señal GPS	234

D.1.3	Ciclo de lectura de la tarjeta de adquisición de datos, procesado de la información y envío a los clientes	235
D.1.4	Ciclo de control del giro del robot	237
D.2	Programa cliente	239
D.2.1	Establecimiento de la conexión	239
D.2.2	Suscripción y desuscripción a las señales sensoriales e interpretación de los mensajes enviados por el servidor	239

Índice de Figuras

2.1	Prototipo actual del robot desarrollado por el grupo de Stentz para el trabajo en el interior de minas	27
2.2	Proyecto ALS desarrollado por el grupo de Stentz	27
2.3	El robot SOJOURNER	31
2.4	a) Robot POCHI, b) Robot TAMA	32
2.5	El robot AURORA	34
2.6	Robots de exteriores del IAI-CSIC: a) robot DÉDALO, b) robot ROJO	35
3.1	Segmento espacio [Dana 95]	40
3.2	Situación de las estaciones monitoras y de la estación maestra	41
3.3	Receptor GPS y su antena	42
3.4	Medida de la distancia a los satélites [Enge 99a]	43
3.5	Principio de funcionamiento del GPS [Enge 99a]	44
3.6	Corrección del error de sincronismo [Dana 95]	45
3.7	Esquema simplificado de un receptor GPS	46
3.8	Señales transmitidas por los satélites [Dana 95]	47
3.9	Estructura del mensaje de navegación	48
3.10	Niveles de servicio del GPS [Enge 99a]	49
3.11	Comparación de la dilución geométrica: a) Geometría de los satélites deficiente, b) Buena geometría de los satélites	51
3.12	Clasificación de las distintas técnicas de empleo del GPS	53

3.13	Posicionamiento absoluto	54
3.14	Principio de funcionamiento del GPS diferencial de área local	55
3.15	Cálculo del valor de la componente entera en el rastreo de la portadora [Herring 96]	56
3.16	Sistema EGNOS	62
3.17	Sistema de transmisión de correcciones diferenciales vía satélite [Huff 95]	68
3.18	Sistema RASANT en España [RNE 00]	70
3.19	Posiciones GPS diferenciales RTK: a) Plano, b) Altitud	71
3.20	Posiciones GPS diferenciales recibiendo correcciones a través del sistema Omnistar: a) Plano, b) Altitud	72
3.21	Posiciones GPS diferenciales recibiendo correcciones a través del sistema RASANT: a) Plano, b) Altitud	73
4.1	El robot tractor ROJO	78
4.2	Diagrama de bloques del robot tractor ROJO	79
4.3	Sistema de actuación en el robot ROJO	81
4.4	Movimiento del pistón: a) izquierda, b) derecha	82
4.5	Control por modulación de ancho de pulso de las válvulas electroneumáticas	82
4.6	Sistema de acoplamiento del compresor al eje del motor de explosión	83
4.7	Situación de los potenciómetros	83
4.8	Ciclo de control del actuador electroneumático	85
4.9	Comparación entre la odometría y el GPS	87
4.10	Sistema odométrico en el robot ROJO	88
4.11	Señal de salida del sensor odométrico	89
4.12	Efecto de la pérdida de tramas diferenciales en el sistema RTK	91
4.13	Arquitectura AMARA	93
4.14	Configuración de la red del IAI-CSIC	95

4.15	Tareas de SERVER	97
4.16	Interfaz del programa SERVER con el usuario	99
4.17	Tareas comunes a todo programa CLIENTE de la arquitectura AMARA	100
4.18	Interfaz del programa CLIENTE con el usuario	101
4.19	Funcionamiento del agente de comportamiento CONTROL REMOTO	102
4.20	Sistema de referencia universal	105
4.21	Sistema de coordenadas de la bicicleta	106
4.22	Cambio de sistema de referencia	106
4.23	Modelo cinemático de la bicicleta	108
4.24	Variación de la posición en coordenadas locales	109
4.25	Desplazamiento del vehículo	110
4.26	Sistema local de coordenadas del robot ROJO	112
4.27	Direccionamiento diferencial	113
5.1	Transformación aproximada	120
5.2	Función de probabilidad normal bidimensional y curva de nivel	122
5.3	Fusión de transformaciones aproximadas	124
5.4	Ruido blanco: a) Función de densidad espectral, b) Función de autocorrelación .	129
5.5	Experimentación seguida para la corrección de los errores sistemáticos y cálculo de la matriz de covarianza de la odometría	146
5.6	Corrección de los errores sistemáticos: a) Camino recorrido mediante conducción manual medido con el GPS centimétrico, b) Ángulo de giro ordenado al volante .	148
5.7	Errores aleatorios	149
5.8	Propagación lineal de la incertidumbre mediante sensores internos	150
5.9	Errores en coordenadas Este y Norte para el receptor 3100LR12 con corrección Omnistar	151

5.10 Función de autocorrelación para el GPS diferencial con sistema Omnistar: a) Coordenada Este, b) Coordenada Norte, c) Orientación	153
5.11 Composición de transformaciones aproximadas	155
5.12 Correlación entre las estimaciones odométricas y GPS	160
5.13 ZOCO: Zona de conducción automática de vehículos	163
5.14 Puntos georeferenciados en ZOCO y segmentos	163
5.15 Definición de direcciones en el grafo	166
5.16 Grafo para ir desde el segmento A al segmento I : a) Camino óptimo, b) Camino alternativo	166
5.17 Grafo para ir desde el segmento A al segmento A : a) $EsteFin < EsteInicio$ y TRUE, b) $EsteFin < EsteInicio$ y FALSE, c) $EsteFin > EsteInicio$ y TRUE, b) $EsteFin > EsteInicio$ y FALSE	168
5.18 Cálculo de la orientación inicial: a) Orientación estimada por el GPS, b) Resultado de filtrar las medidas	170
5.19 Seguimiento de caminos	171
5.20 Persecución pura	171
5.21 Variación de las coordenadas locales	172
5.22 Acercamiento del vehículo a una línea recta	173
5.23 Estimación de la posición por odometría (trazo discontinuo) y GPS (puntos discretos): a) Coordenadas en el plano, b) Orientación	175
5.24 Estimación de la posición por odometría (trazo discontinuo) y GPS (puntos discretos): a) Coordenadas en el plano, b) Orientación	176
5.25 Camino de referencia (trazo continuo) y camino resultante de la fusión (trazo discontinuo) de las medidas odométricas y GPS de la figura 5.23: a) Coordenadas en el plano, b) Orientación	177
5.26 Camino de referencia (trazo continuo) y camino resultante de la fusión (trazo discontinuo) de las medidas odométricas y GPS de la figura 5.24: a) Coordenadas en el plano, b) Orientación	177
5.27 Problema de la fusión con medidas fuera de rango de la señal GPS	178

5.28 Solución al problema de las medidas fuera de rango de la señal GPS	180
5.29 Secuencia de acciones del agente VE A PUNTO	181
5.30 Puntos de inicio y fin: a) Experimento 1, b) Experimento 2	182
5.31 Agente VE A PUNTO para ir del segmento A al I: a) Trayectoria, b) Ángulo de giro ordenado al volante	183
5.32 Agente VE A PUNTO para ir del segmento A al A: a) Trayectoria, b) Ángulo de giro ordenado al volante	184
A.1 Receptor GPS GN-74	191
A.2 Receptor GPS G8	193
A.3 Receptor GPS Z12	194
A.4 Receptor GPS ACEII	195
A.5 Receptor GPS 3100LR12	196
A.6 El receptor GPS MS750	197
A.7 Esquema de conexión del equipo GPS MS750	197
B.1 Índice de suavizado 1 e índice dinámico 3: a) Plano, b) Altitud	208
B.2 Índice de suavizado 2 e índice dinámico 2: a) Plano, b) Altitud	209
B.3 Índice de suavizado 3 e índice dinámico 1: a) Plano, b) Altitud	209
B.4 Evolución del número de satélites y del PDOP en el tiempo	211
B.5 Constelación de satélites: a) PDOP: 3, b) PDOP: 4.3	211
B.6 PDOP umbral igual a 6: a) Plano, b) Altitud	212
B.7 PDOP umbral igual a 2: a) Plano, b) Altitud	213
B.8 PDOP umbral igual a 0: Posicionamiento en el plano	213
B.9 Posicionamiento en el plano con umbrales de enmascaramiento por ángulo de elevación: a) 10°, b) 20°, c) 40°	215
B.10 Constelación de los seis satélites en el campo de visión del receptor	216

B.11 Latitud y longitud posicionando con cuatro satélites: a) menor PDOP, b) mayor PDOP	217
B.12 Posiciones con el receptor G8: a) Plano, b) Altitud	219
B.13 Posiciones con el receptor 3100LR12: a) Plano, b) Altitud	219
B.14 Posiciones con el receptor Z12: a) Plano, b) Altitud	220
B.15 Posiciones con el receptor ACEII: a) Plano, b) Altitud	220
B.16 Reproducción de un camino rectangular con un único receptor GPS	222
B.17 Receptor GPS G8 en modo absoluto en ausencia de la S/A: a) Plano, b) Altitud	223
B.18 Receptor GPS 3100LR12 en modo absoluto en ausencia de la S/A: a) Plano, b) Altitud	223
B.19 Receptor GPS ACEII en modo absoluto en ausencia de la S/A: a) Plano, b) Altitud	224
C.1 Coordenadas longitud, latitud y altitud	227
C.2 Zonas UTM [Dana 95]	228
C.3 Zonas UTM	229

Índice de Tablas

3.1	Componentes de la señal y su frecuencia	46
3.2	Recopilación de errores [Dana 95]	50
3.3	Medidas de precisión para las distintas técnicas diferenciales de área global	72
4.1	Características físicas del actuador neumático	81
4.2	Conjunto de reglas	86
4.3	Comparación entre técnicas DGPS en tiempo real	92
5.1	Coordenadas UTM y locales de los vértices de ZOCO	164
5.2	Campo <i>Identificación de las calles de ZOCO</i>	165
5.3	Campo <i>dirección</i>	166
5.4	Orientación de las calles de ZOCO	169
5.5	Coordenadas en pixels y locales	170
A.1	Estructura del mensaje GGA	200
A.2	Estructura del mensaje GLL	200
A.3	Estructura del mensaje GSA	201
A.4	Estructura del mensaje GSV	201
A.5	Estructura del mensaje RMC	202
A.6	Estructura del mensaje VTG	202
A.7	Estructura del mensaje ZDA	203

A.8	Estructura del mensaje POS	203
B.1	Valores de índice de suavizado y dinámico	206
B.2	Medidas de precisión en función de los diferentes pares de índices de suavizado y dinámico	208
B.3	Medidas de precisión según diferentes valores de PDOP umbral	213
B.4	Medidas de precisión con diferentes umbrales de elevación	214
B.5	Índice PDOP en función del número de satélites empleados para posicionar	217
B.6	Medidas de precisión con el mejor y peor PDOP empleando cuatro satélites	218
B.7	Medidas de precisión con diferentes receptores GPS en modo absoluto (S/A activa)	219
B.8	Medidas de precisión con diferentes receptores GPS en modo absoluto	223
B.9	Incremento de la precisión tras el cese de la S/A	224
D.1	Comunicación cliente \Rightarrow servidor: Mensajes de suscripción y desuscripción	233
D.2	Comunicación cliente \Rightarrow servidor: Mensajes de activación del control del giro y mensajes especiales	234
D.3	Comunicación servidor \Rightarrow cliente: Mensajes de envío de datos sensoriales	235
D.4	Valores del vector de <i>estado</i> y significado	238

Lista de símbolos

Letras minúsculas

- d Distancia entre la posición actual del robot móvil y el punto objetivo.
- d_giro Distancia mínima para el giro del robot.
- d_fin Distancia umbral para ordenar la parada del robot.
- $ds(t)$ Distancia recorrida por el vehículo entre dos estimaciones sucesivas (calibración del vehículo: cálculo de la matriz de covarianza de la odometría).
- dS Distancia en línea recorrida por el vehículo para el cálculo de la matriz de covarianza de la odometría (calibración).
- e_b Componente blanca del error asociado a la posición.
- $e_f(t)$ Error asociado a las medidas de posición obtenidas por fusión sensorial en el instante t .
- $e_{GPS}(t)$ Error asociado a las estimaciones GPS.
- $e_{og}(t)$ Error asociado a las estimaciones de posición (coordenadas en el plano y orientación) obtenida por odometría en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $e_{op}(t)$ Error asociado a las estimaciones de posición (coordenadas en el plano y orientación) obtenida por odometría en el instante t a partir de una posición de partida (esto es, referida al sistema de referencia local del vehículo).
- $e_p(t)$ Error asociado a las estimaciones de la posición (coordenadas en el plano y orientación) de partida o de inicio para cada estimación odométrica en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $e_{1g}(t)$ Error asociado a las medidas de posición obtenidas por un *sensor1* genérico en el instante t .
- $e_{2g}(t)$ Error asociado a las medidas de posición obtenidas por un *sensor2* genérico en el instante t .
- n Número de rectas que componen el grafo.

- r Radio de giro del centro de referencia del sistema local al vehículo.
- v Velocidad instantánea del centro de referencia del vehículo.
- \hat{v} Estimación, a partir de los sensores internos, de la velocidad instantánea del centro de referencia del vehículo.
- v_d Velocidad de avance de la rueda derecha del vehículo.
- \hat{v}_d Estimación, a partir de los sensores internos, de la velocidad de avance de la rueda derecha.
- v_i Velocidad de avance de la rueda izquierda del vehículo.
- \hat{v}_i Estimación, a partir de los sensores internos, de la velocidad de avance de la rueda izquierda.
- \hat{x} Coordenada x estimada.
- x_d Coordenada x del punto destino del robot expresada en píxels del dibujo.
- x_{desf} Diferencia en el eje X entre la estimación del GPS y las coordenadas del punto más cercano del segmento donde el vehículo se encuentra.
- $\hat{x}_f(t)$ Mejor estimación de la coordenada x de la posición en el instante t obtenida por fusión sensorial.
- x_{fin} Coordenada x del punto destino del robot respecto al sistema de referencia local de ZOCO situado en el centro de la Pta. del Sol de ZOCO, expresada en metros.
- x_g Coordenada x en el sistema de referencia global o universal.
- $\hat{x}_{GPS}(t)$ Componente x de $\hat{LOC}_{GPS}(t)$.
- $\hat{x}_{og}(t)$ Componente x de $\hat{LOC}_{og}(t)$.
- $\hat{x}_{op}(t)$ Componente x de $\hat{LOC}_{op}(t)$.
- $\hat{x}_p(t)$ Componente x de $\hat{LOC}_p(t)$.
- x_{0g} Coordenada x del origen del sistema de referencia local O_l expresada en coordenadas globales.
- $\hat{x}_{1g}(t)$ Componente x de la posición estimada por un *sensor1* genérico.
- $\hat{x}_{2g}(t)$ Componente x de la posición estimada por un *sensor2* genérico.
- \hat{y} Coordenada y estimada.
- y_d Coordenada y del punto destino del robot expresada en píxels del dibujo.
- y_{desf} Diferencia en el eje Y entre la estimación del GPS y las coordenadas del punto más cercano del segmento donde el vehículo se encuentra.
- $\hat{y}_f(t)$ Mejor estimación de la coordenada y de la posición del vehículo en el instante t obtenida por fusión sensorial.

y_{fin} Coordenada y del punto destino del robot respecto al sistema de referencia local de ZOCO situado en el centro de la Pta. del Sol de ZOCO, expresada en metros.

y_g Coordenada y en el sistema de referencia global o universal.

$\hat{y}_{GPS}(t)$ Componente y de $\hat{LOC}_{GPS}(t)$.

$\hat{y}_{og}(t)$ Componente y de $\hat{LOC}_{og}(t)$.

$\hat{y}_{op}(t)$ Componente y de $\hat{LOC}_{op}(t)$.

$\hat{y}_p(t)$ Componente y de $\hat{LOC}_p(t)$.

y_{0g} Coordenada y del origen del sistema de referencia local O_l expresada en coordenadas globales.

$\hat{y}_{1g}(t)$ Componente y de $\hat{LOC}_{1g}(t)$.

$\hat{y}_{2g}(t)$ Componente y de $\hat{LOC}_{2g}(t)$.

Letras mayúsculas

Cov Matriz de covarianza, incertidumbre en la estimación.

Cov_{blanco} Matriz de covarianza o esperanza matemática de la componente blanca del error en la posición al cuadrado asociado a un sensor genérico.

$Cov_{blancoGPS}$ Matriz de covarianza o esperanza matemática de la componente blanca del error en la posición al cuadrado asociado a las estimaciones GPS.

Cov_{color} Matriz de covarianza o esperanza matemática de la componente coloreada del error en la posición al cuadrado asociado a un sensor genérico.

$Cov_{colorGPS}$ Matriz de covarianza o esperanza matemática de la componente coloreada del error en la posición al cuadrado asociado a las estimaciones GPS.

$Cov_f(t)$ Incertidumbre asociada a la mejor estimación de la posición obtenida en el instante t por fusión sensorial.

Cov_{GPSpos} Matriz de covarianza de las coordenadas latitud-longitud estimada por el GPS.

Cov_{GPSori} Matriz de covarianza de la orientación estimada por el GPS.

Cov_{GPS} Matriz de covarianza del GPS.

Cov_{og} Matriz de covarianza de la odometría obtenida experimentalmente.

$Cov_{og}(t)$ Matriz de covarianza de la odometría obtenida al propagar la incertidumbre expresada en el sistema de referencia global.

$\tilde{Cov}_{og}(t)$ $Cov_{og}(t)$ aumentada: engloba los términos dependientes de las medidas realizadas por la odometría y el GPS.

- $Cov_{ogGPS}(t)$ Matriz que indica la correlación entre las medidas de posición obtenidas por odometría y GPS en el instante t .
- $Cov_{op}(t)$ Matriz de covarianza de la odometría obtenida al propagar la incertidumbre a partir de una posición de partida, esto es, expresada en el sistema de referencia local al vehículo.
- $Cov_p(t)$ Matriz de covarianza de la odometría asociada a la posición de partida, expresada en el sistema de referencia global del vehículo.
- $Cov_{1g}(t)$ Incertidumbre asociada a la estimación de la posición obtenida por un *sensor1* genérico en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $\tilde{Cov}_{1g}(t)$ $Cov_{1g}(t)$ aumentada: engloba los términos dependientes de las medidas realizadas por los sensores.
- $Cov_{2g}(t)$ Incertidumbre asociada a la estimación de la posición obtenida por un *sensor2* genérico en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $Cov_{1g2g}(t)$ Matriz que indica la correlación entre las medidas de posición obtenidas por un *sensor1* y un *sensor2* genéricos en el instante t .
- D Distancia por delante del punto más cercano del vehículo a la trayectoria, medido sobre el propio camino de referencia.
- $G(t)$ Ganancia: pondera la diferencia entre la mejor estimación de la posición obtenida a través de los sensores a bordo del robot.
- $J(t)$ Matriz jacobiana.
- K Mitad de la distancia entre los puntos de apoyo de las ruedas traseras del robot ROJO.
- $K(t)$ Ganancia del filtro de Kalman.
- $Loc_f(t)$ Posición real (coordenadas en el plano y orientación) en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $\hat{Loc}_f(t)$ Mejor estimación de la posición (coordenadas en el plano y orientación) obtenida por fusión sensorial en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $\hat{Loc}_{GPS}(t)$ Estimación de la posición (coordenadas en el plano y orientación) obtenida por el GPS en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $\hat{Loc}_{og}(t)$ Estimación de la posición (coordenadas en el plano y orientación) obtenida por odometría en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $\tilde{Loc}_{og}(t)$ $\hat{Loc}_{og}(t)$ aumentado: engloba los términos de dependencia entre las estimaciones de posición de la odometría y del GPS.
- $\hat{Loc}_{op}(t)$ Estimación de la posición (coordenadas en el plano y orientación) obtenida por odometría en el instante t a partir de una posición de partida (esto es, referida al sistema de referencia local del vehículo).

- $\hat{Loc}_p(t)$ Estimación de la posición (coordenadas en el plano y orientación) de partida o de inicio para cada estimación odométrica en el instante t respecto al sistema de referencia global.
- $\hat{Loc}_{1g}(t)$ Posición (coordenadas en el plano y orientación) estimada por un *sensor1* genérico en el instante t referida al sistema de referencia global.
- $\tilde{Loc}_{1g}(t)$ $\hat{Loc}_{1g}(t)$ aumentado: engloba los términos de dependencia entre las medidas de los sensores.
- $\hat{Loc}_{2g}(t)$ Posición (coordenadas en el plano y orientación) estimada por un *sensor2* genérico en el instante t referida al sistema de referencia global.
- $M(t)$ Suma de las matrices de covarianza $Cov_{1g}(t)$ y $Cov_{2g}(t)$.
- O_l Origen del sistema de coordenadas local al vehículo.
- O_g Origen del sistema de coordenadas global o universal.
- P_i $i = 0, \dots, 8$ Vértices de ZOCO.
- $P(Loc_f(t))$ Función de probabilidad conjunta asociada a las medidas de posición obtenida por distintos sensores en el instante t expresadas en el sistema de referencia global.
- $P_{1g}(Loc_f(t))$ Función de probabilidad asociada a las medidas de posición obtenidas por un *sensor1* genérico en el instante t expresadas en el sistema de referencia global.
- $P_{2g}(Loc_f(t))$ Función de probabilidad asociada a las medidas de posición obtenidas por un *sensor2* genérico en el instante t expresadas en el sistema de referencia global.
- R_t Función de autocorrelación.
- S_l Sistema local de coordenadas.
- S_g Sistema global de coordenadas.
- S_{jw} Función de densidad espectral.
- T Transformación aproximada.
- $T_f(t)$ Transformación aproximada asociada a la mejor estimación de la posición en el instante t obtenida por fusión sensorial.
- $T_{GPS}(t)$ Transformación aproximada asociada a las medidas GPS.
- $T_{og}(t)$ Transformación aproximada asociada a la odometría, expresada en el sistema de referencia global.
- $T_{op}(t)$ Transformación aproximada obtenida por propagación de la incertidumbre, expresada en el sistema de referencia local del vehículo.
- $T_p(t)$ Transformación aproximada asociada a la posición de partida para la odometría, expresada en el sistema de referencia local del vehículo.

- $T_{1g}(t)$ Transformación aproximada asociada a la posición estimada por un *sensor1* genérico en el instante t referida al sistema de referencia global.
- $T_{2g}(t)$ Transformación aproximada asociada a la posición estimada por un *sensor2* genérico en el instante t referida al sistema de referencia global.
- X_d Eje X del sistema de coordenadas en píxels del dibujo.
- X_l Eje X del sistema de coordenadas local al vehículo.
- X_g Eje X del sistema de coordenadas global al vehículo.
- X_{0l} Eje X del sistema de coordenadas local de ZOCO, situado en el centro de la Pta. del Sol.
- Y_d Eje Y del sistema de coordenadas en píxels del dibujo.
- Y_l Eje Y del sistema de coordenadas local al vehículo.
- Y_g Eje Y del sistema de coordenadas global al vehículo.
- Y_{0l} Eje Y del sistema de coordenadas local de ZOCO, situado en el centro de la Pta. del Sol.
- Z_l Eje Z del sistema de coordenadas local al vehículo.
- Z_g Eje Z del sistema de coordenadas global al vehículo.

Letras griegas

- α Ángulo de direccionamiento.
- $\delta(i, j)$ Delta de Kronecker.
- $\Delta\phi$ Variación de la orientación.
- $\Delta\hat{\phi}$ Estimación de la variación de la orientación del vehículo a partir de medidas internas.
- $\Delta\phi_f(t)$ Componente ϕ del error de posición obtenido por fusión sensorial.
- Δs Espacio recorrido por en centro de referencia del vehículo.
- $\Delta\hat{s}$ Estimación del espacio recorrido por el centro de referencia del vehículo a partir de medidas internas.
- Δs_d Espacio recorrido por la rueda derecha del vehículo.
- $\Delta\hat{s}_d$ Estimación del espacio recorrido por la rueda derecha del vehículo a partir de medidas internas.
- Δs_i Espacio recorrido por la rueda izquierda del vehículo.
- $\Delta\hat{s}_i$ Estimación del espacio recorrido por la rueda izquierda del vehículo a partir de medidas internas.
- Δt Intervalo de tiempo.

- Δx_l Variación de la coordenada x de la posición del vehículo en el sistema de referencia local.
- Δx_g Variación de la coordenada x de la posición del vehículo en el sistema de referencia global o universal.
- $\Delta x_f(t)$ Componente x del error de posición obtenido por fusión sensorial.
- Δy_l Variación de la coordenada y de la posición del vehículo en el sistema de referencia local.
- Δy_g Variación de la coordenada y de la posición del vehículo en el sistema de referencia global o universal.
- $\Delta y_f(t)$ Componente y del error de posición obtenido por fusión sensorial.
- ϕ Orientación: ángulo entre el eje Y del sistema de coordenadas local (Y_l) y el eje Y del sistema de coordenadas global (Y_g).
- $\hat{\phi}$ Estimación de la orientación.
- $\hat{\phi}_f(t)$ Mejor estimación de la orientación en el instante t obtenida por fusión sensorial.
- $\hat{\phi}_{GPS}(t)$ Componente ϕ de $\hat{L}oc_{GPS}(t)$.
- $\hat{\phi}_{og}(t)$ Componente ϕ de $\hat{L}oc_{og}(t)$.
- $\hat{\phi}_{op}(t)$ Componente ϕ de $\hat{L}oc_{op}(t)$.
- $\hat{\phi}_p(t)$ Componente ϕ de $\hat{L}oc_p(t)$.
- $\hat{\phi}_{1g}(t)$ Componente ϕ de $\hat{L}oc_{1g}(t)$.
- $\hat{\phi}_{2g}(t)$ Componente ϕ de $\hat{L}oc_{2g}(t)$.
- γ Curvatura del vehículo.
- $\hat{\gamma}$ Estimación de la curvatura del vehículo a través de medidas internas.
- ω Velocidad angular del centro de referencia del vehículo.
- ρ Coeficiente de correlación.
- ρ_1 Coeficiente de correlación asociado a los errores de las estimaciones de un *sensor1* genérico.
- ρ_2 Coeficiente de correlación asociado a los errores de las estimaciones de un *sensor2* genérico.
- ρ_{12} Coeficiente de correlación entre los errores de las estimaciones de un *sensor1* y de un *sensor2* genéricos.
- $\hat{\omega}$ Estimación de la velocidad angular del vehículo a través de medidas internas.
- ζ Distancia entre los puntos de apoyo de las ruedas traseras y delanteras en el modelo cinemático de la bicicleta.

Siglas y acrónimos

- AENA Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea.
- ALS Sistema de carga autónoma (*Autonomous Loading System*).
- AMARA Arquitectura MultiAgente para Robots Autónomos.
- BPSK *Binary Phase Shift Keying*.
- C/A Adquisición gruesa (*Coarse acquisition*).
- CAS Servicio de acceso controlado (*Controlled Access Service*).
- CEP Error Circular Probable.
- CICYT Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.
- CMU Universidad de Carnegie Mellon.
- CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- DC Ciclo de trabajo (*Duty cycle*).
- DGPS Sistema de posicionamiento global diferencial (*Differential Global Positioning System*).
- DMA Agencia de defensa de cartografía (*Defense Mapping Agency*).
- DOP Dilución de la precisión (*Dilution Of Precision*).
- DTE Departamento de Tecnología Electrónica.
- EC Comisión Europea (*European Commission*).
- ECAC Conferencia europea de aviación civil (*European Civil Aviation Conference*).
- EGNOS Servicio de navegación europeo cubierto por satélites geoestacionarios *European geostationary navigation overlay service*.
- EMT Empresa Malagueña de Transporte.
- ESA Agencia espacial europea (*European Spacial Agency*).
- FM Frecuencia modulada.
- GDOP Dilución de la precisión geométrica (*Geometric dilution Of precision*).
- GLONASS Sistema global de navegación por satélites (*Global navigation satellites system*).
- GNOS Sistema global de navegación cubierto por satélites (*Global navigation overlay system*).
- GPA Grupo de percepción activa.
- GPS Sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System*).
- GSM Sistema global para comunicaciones móviles (*Global System for Mobile Communications*).

- IAI Instituto de Automática Industrial.
- INS Sistema de navegación inercial (*Inertial Navigation System*).
- JPL Jet Propulsion Laboratory.
- HDOP Dilución de la precisión horizontal (*Horizontal Dilution Of Precision*).
- LADGPS DGPS de área local (*Local Area Differential Global Positioning System*).
- LORAN Navegación de largo alcance (*Long Range Navigation*).
- LVANRW Landersvermessungsamt Nordrhein-Westfalen.
- MCC Centro de control maestro (*Master Control Center*).
- MIT Instituto Tecnológico de Massachusetts (*Technology Institute of Massachusetts*).
- MITI Ministerio de Comercio Internacional de Industria Japonés.
- NASA *National Aeronautics and Space Administration*.
- NLES Estaciones para navegación terrestre (*Navigation land earth station*).
- NMEA Asociación de electrónica marítima nacional (*National marine electronics association*).
- NREC National Robotics Engineering Consortium.
- OAS Servicio de acceso abierto (*Open access service*).
- OTAN Organización del tratado del Atlántico norte.
- P Precision code.
- PALMA Potenciación de los procesos de movilidad y orientación en personas con discapacidad mediante sensores de proximidad.
- PDOP Dilución de la precisión en posición (*Position dilution of precision*).
- PPS Servicio de posicionamiento preciso (*Precise positioning service*).
- PRN Ruido pseudoaleatorio (*Pseudorange Noise*).
- PWM Modulación de ancho de pulso (*Pulse width modulation*).
- RASANT Técnica de navegación por radio asistida por satélite (*Radio aided satellite navigation technique*).
- RDOP Dilución de la precisión relativa (*Relative dilution of precision*).
- RDS Radio data system.
- RIMS Ranging and Integrity Monitoring Stations.
- rms Error cuadrático medio.
- RTCM SC Comisión técnica de radio para servicio marítimo, comité especial (*Radio technical commission for maritime service, special committee*).

- RTK Real time kinematic.
- S/A Disponibilidad selectiva (*Selective availability*).
- SIAMO Sistema integrado de ayuda a la movilidad.
- SPS Servicio de posicionamiento estándar (*Standar Positioning Service*).
- TDOP Dilución de la precisión en tiempo (*Time dulution of precision*).
- UMA Universidad de Málaga.
- UPS Universal polar stereographics.
- USAF Fuerzas aéreas de los Estados Unidos (*United States Air Force*).
- UTC Coordenadas de tiempo universales (*Universal time coordinates*).
- UTM *Universal transverse mercator projection*.
- VDOP Dilución de la precisión vertical (*Vertical dilution of precision*).
- W Código empleado para encriptar el código militar P de las señales GPS.
- WAAS *Wide Area Augmentation System*.
- WADGPS DGPS de área global (*Wide area differential global positioning system*).
- WDR *West deutshe rundfunk*.
- WGS-84 Sistema geodésico mundial 1984 (*World geodetic system 1984*).
- Y Código militar encriptado de las señales GPS.
- ZOCO Zona de conducción automática de vehículos.
- 2D Bidimensional.
- 3D Tridimensional.

Capítulo 1

Introducción

*Si vas a emprender el viaje hacia Ítaca,
pide que tu camino sea largo,
rico en sabiduría, en conocimiento.*

Konstantino Kavafis (*Ítaca*)

Uno de los campos más prometedores de la robótica móvil es aquél cuyo objetivo consiste en dotar de autonomía a vehículos para realizar una navegación "inteligente", encaminada a reducir la intervención de operadores humanos en tareas rutinarias o bajo condiciones tóxicas o climáticas adversas, así como en tareas peligrosas o imposibles para el hombre. Cada vez se encuentra más extendido el empleo de robots móviles en minería, construcción, agricultura, desactivación de explosivos, expediciones espaciales, planetarias, submarinas, etc. Se contemplan también aplicaciones de interés social, como el empleo de robots móviles para asistir a personas con discapacidad motórica o visual.

La autonomía conlleva la existencia de una dotación sensorial y de técnicas de procesamiento perceptuales para percibir y modelar el estado y comportamiento del propio vehículo y del entorno, a fin de planificar estrategias de movimiento y tomar decisiones. Un aspecto fundamental en el desarrollo de móviles autónomos es el de su localización, es decir, el conocimiento preciso, continuo e inmediato de la posición del vehículo¹, lo que constituye la tarea básica de su arquitectura de control, sobre la que se apoyarán otras tareas de más alto nivel.

La determinación de la posición de un vehículo en ambientes poco estructurados, como son los entornos naturales, es un problema complejo de resolver. En primer lugar, por la ausencia de referencias en espacios abiertos, lo que dificulta el cálculo de la posición del vehículo. En segundo lugar, por la gran variedad de situaciones e interacciones imprevisibles que se pueden presentar en el entorno de trabajo, unido a la imprecisión propia de los dispositivos sensoriales

¹Se entiende por posición de un vehículo en el plano la terna (x, y, ϕ) , es decir, sus coordenadas en el plano (x, y) y su ángulo de orientación ϕ .

y de control.

En los últimos años se han propuesto una gran variedad de técnicas de posicionamiento de robots móviles. Su planteamiento varía considerablemente en función del medio en el cual se mueve el robot, del conocimiento que se posea tanto del entorno como de la tarea a realizar, y del conjunto de sensores disponible.

En general, la posición puede obtenerse a través de sensores internos y externos. Los primeros proporcionan de forma continua e inmediata la localización del robot sin conocimiento alguno del entorno. Dentro de este grupo se incluyen los basados en la odometría del vehículo, que a través del cómputo del número de vueltas dadas por las ruedas miden distancia recorrida, y los sistemas de navegación inercial, como giróscopos, brújulas, inclinómetros y acelerómetros.

Sin embargo, a pesar de su continuidad y bajo coste, los sensores internos no se utilizan como único sistema de posicionamiento, ya que las condiciones abruptas e irregulares del terreno y la extensión de los recorridos a realizar hacen que sus estimaciones de posición lleven asociadas un error elevado que se acumula con el avance del vehículo. Este error se debe, entre otras causas, a deslizamientos de las ruedas, desajustes en el alineamiento, existencia de más de un punto de contacto entre la rueda y el suelo, baja resolución del sensor o baja frecuencia de muestreo. De todas ellas, sólo aquellas causadas por imperfecciones en el diseño mecánico y sensorial del vehículo se mantienen constantes (errores sistemáticos), pudiendo ser eliminados mediante una adecuada calibración.

Respecto a los sensores externos, las técnicas de posicionamiento absoluto basan sus medidas en las relaciones del vehículo con los elementos externos como son: sistemas de balizas, marcas activas o pasivas y satélites. Cada una de estas técnicas proporcionan la posición del vehículo respecto a un sistema de referencia global, y pueden ser implantadas utilizando una gran variedad de métodos y sensores, como cámaras de vídeo con luz blanca o láser, sensores de ultrasonido o sistemas de posicionamiento global como GPS (*Global Positioning System*). Las cámaras de vídeo y los sensores de ultrasonido son más adecuados para la detección de obstáculos próximos en interiores, activando estrategias de navegación para evitarlos. El láser permite un reconocimiento de estructuras en exteriores y la localización del vehículo siempre que exista un sistema conocido de balizas. Por último, los sistemas de posicionamiento global mediante satélites son extremadamente útiles en la tarea de la localización de vehículos en exteriores. Esto se debe a que el error cometido en la estimación de la posición se encuentra acotado y no depende de la distancia recorrida por el vehículo, como en el caso de los sensores internos. Además, la información que proporcionan no requiere de un exhaustivo filtrado y análisis. La localización del vehículo se calcula mediante técnicas de triangulación utilizando como balizas un conjunto de satélites en el espacio, lo que no implica modificar el entorno de

trabajo. Sin embargo, para obtener una precisión aceptable en tiempo real, se precisan técnicas diferenciales capaces de reducir el error en el cálculo de la posición en un margen de 5 metros a pocos centímetros. Cuanto mayor sea la precisión requerida mayor será el coste del sistema, ascendiendo en la actualidad a varios millones de pesetas para precisiones centimétricas.

No obstante, y a pesar de utilizar GPS diferenciales muy precisos que harían pensar en su empleo como única herramienta de posicionamiento del vehículo, situaciones muy comunes en cualquier tarea de navegación en exteriores no permiten el uso del GPS, o bien reducen considerablemente su potencial: apantallamiento de la señal GPS al moverse en la proximidad de árboles, interferencias al pasar bajo tendidos eléctricos, etc.

Todo ello pone de manifiesto la imposibilidad de conseguir una estimación continua, en tiempo real y con la precisión requerida para la tarea de la posición del vehículo con un único tipo de sensor. Por tanto, para cumplir los requisitos de precisión, disponibilidad y robustez obligados en todo sistema de posicionamiento, se necesitan varias estimaciones de posición calculadas por sensores redundantes y complementarios, obteniendo la mejor estimación de la posición del vehículo mediante la correcta combinación de la información que proporcionan. De esta forma, pueden emplearse sensores de menor coste sin afectar a la precisión total del sistema.

Para un robot de exteriores y según las consideraciones expuestas anteriormente, un sistema sensorial sencillo para el posicionamiento podría consistir en un receptor GPS como sensor externo y en un odómetro como sensor interno. Así, en el caso de disponer de sensores GPS y de la odometría del vehículo, son tres las estrategias de empleo conjunto de la información que sobre la posición proporcionan estos sensores.

La primera de ellas consiste en utilizar la odometría hasta que la distancia recorrida por el vehículo sea superior a un cierto umbral, y entonces acudir a la estimación proporcionada por el GPS. Presenta el inconveniente de que la ausencia de señal GPS en el momento de la corrección obliga a navegar con una estimación odométrica de error alto.

La segunda opción utiliza como estimador de la posición el GPS y, cuando éste no reciba señal, se acude a la estimación del odómetro. En este caso, la estimación del odómetro en recorridos largos es muy imprecisa.

La tercera opción utiliza el GPS como herramienta principal para el posicionamiento y para mejorar continuamente la estimación proporcionada por el odómetro. De esta forma, si desaparece la señal del GPS durante un periodo de tiempo largo, la estimación del odómetro será fiable por haberse corregido con las estimaciones previas del GPS.

Tradicionalmente se ha utilizado el filtro de Kalman como herramienta de fusión sensorial. Esta

técnica se basa en la aplicación del método de mínimos cuadrados para actualizar, utilizando medidas de las salidas, las estimaciones obtenidas al propagar las estimaciones del instante anterior según las ecuaciones del modelo. Así, en el caso que nos ocupa, la entrada al filtro consiste en la posición obtenida a partir de los sensores a bordo del robot, y la salida la mejor estimación de su posición. Su aplicación requiere que los ruidos de las variables involucradas sean blancos, conocidos e independientes entre sí. Si el comportamiento del filtro difiere de este comportamiento ideal, existen problemas de divergencia, ya sean debidos al modelado de las variables como a la existencia de variables no observables cuya evolución es desconocida.

Sin embargo, estas condiciones ideales no se cumplen para el sistema sensorial descrito. Las medidas calculadas con el sensor interno están afectadas por ruido blanco, esto es, por un ruido con media nula y sin relación temporal consigo mismo, siempre que los sensores se encuentren bien calibrados. Por el contrario, en el caso del sistema GPS, los errores en las medidas se encuentran autocorrelacionados en el tiempo o coloreados, es decir, dependen del error en la medida realizada por el sensor en un instante anterior. Además, si se emplea la tercera de las técnicas expuestas, debido a la consideración de corregir las medidas odométricas con las estimaciones dadas por el GPS, la información de uno y otro sensor poseen componentes comunes o son dependientes entre sí.

Surge, por tanto, la necesidad de desarrollar un algoritmo de fusión sensorial que considere no sólo la dependencia de los errores asociados a las medidas realizadas por los diferentes sensores, sino también las relaciones de dependencia entre ellas. Mediante la correcta integración de los dispositivos sensoriales de posición y de actuación sobre el vehículo, se consigue ejecutar con precisión órdenes elementales del tipo: *avanza, gira a la izquierda, retrocede*, etc. Estas acciones, convenientemente organizadas y combinadas, permitirán la realización de tareas más complejas, adecuando la estructura simbólica de representación de la información y adopción de decisiones a la tarea encomendada a las posibilidades del vehículo y a las características del entorno en que navega.

Por todo ello, el correcto posicionamiento del robot móvil resulta de vital importancia, pues de cómo se estime la posición del vehículo radica el éxito de la misión.

1.1 Objetivos de la tesis

El trabajo de investigación expuesto en la presente memoria se ha desarrollado a través de un convenio de colaboración entre el Dpto. de Tecnología Electrónica (DTE) de la Universidad de Málaga (UMA) y el Instituto de Automática Industrial (IAI) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en Arganda del Rey (Madrid), a través de los proyectos

de investigación *Sistema de Exploración Autónomo basado en Visión Foveal y Activa (CICYT TIC98-0562)* y *Arquitectura multiagente: generación de comportamiento complejo para un robot de pulverización en exteriores (CICYT-TAP98-0781)*.

El objetivo de este último proyecto se centra en la creación de una arquitectura jerárquica que, integrando agentes de comportamientos reactivos y planificados, convenientemente organizados, permita la *navegación autónoma de un robot dotado de múltiples sensores en un entorno natural* mientras realiza una tarea compleja como la fumigación selectiva de un campo de olivos. Este planteamiento ha requerido la completa automatización de un tractor cortacésped comercial (el robot tractor ROJO) y el estudio, diseño e implementación de los agentes de comportamiento básicos para el movimiento elemental del mismo (avance/parada y giro). Para dotarlo de movimiento autónomo se precisa conocer como elemento principal la posición del vehículo de forma continua, en tiempo real y con la precisión requerida para la tarea, todo ello teniendo en cuenta la complejidad de los entornos agrícolas. Sobre este último aspecto trata el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis.

Por tanto, la finalidad de la presente tesis consiste en la resolución del problema de posicionamiento y localización de un vehículo, así como su control, en un entorno natural, empleando un mínimo número de sensores y cumpliendo con los requisitos de continuidad, robustez y precisión. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Estudiar e implantar un sistema sensorial en el tractor formado por un mínimo número de sensores complementarios y redundantes que permitan localizar al robot móvil en un entorno de exteriores, guardando un equilibrio en la relación precisión/precio del equipo para la tarea requerida.
- Desarrollar un modelo matemático de fusión sensorial para obtener la mejor estimación de la posición del vehículo a partir de las estimaciones con incertidumbre proporcionadas por los sensores a bordo del robot.
- Integrar el sistema en la arquitectura jerárquica y organización de los agentes de comportamiento de forma que, mediante la activación de los agentes básicos de movimiento elemental del tractor y del conocimiento preciso de la posición, permita su desplazamiento seguro de un punto a otro del sembrado.
- Validar experimentalmente el sistema sobre el tractor autónomo ROJO mediante la creación del agente de comportamiento VE A PUNTO.

1.2 Organización de la tesis

Esta tesis se organiza en seis capítulos y cuatro apéndices.

Este primer capítulo de introducción está dedicado a presentar el problema que aborda la tesis, los objetivos que se proponen para su resolución y la organización en capítulos de la misma.

El capítulo 2 se titula *La robótica móvil en exteriores*. Comienza el capítulo con unas reflexiones acerca de la evolución que ha sufrido la robótica desde los primeros manipuladores industriales hasta los modernos robots móviles autónomos de exteriores. Se presenta la necesidad de una localización precisa de tales vehículos para lograr con éxito el cumplimiento de la misión y se ofrece un recorrido por las diferentes técnicas para la localización de vehículos autónomos. Finalmente, se presenta una revisión bibliográfica de los robots móviles aplicados que han ido apareciendo a lo largo de la breve historia de la Robótica Móvil.

El capítulo 3 lleva por título *GPS: Sistema de posicionamiento global mediante satélites*. En él se describe de forma detallada el estado del arte y principios de funcionamiento de este importante sistema de posicionamiento global. Se presenta un estudio de las diferentes técnicas de empleo del GPS en modo diferencial para el posicionamiento de vehículos autónomos.

En el capítulo 4, denominado *El robot tractor ROJO*, se describe la plataforma robótica de exteriores con la que se trabajará a lo largo de esta tesis. En primer lugar, se presenta el sistema de actuación para gobernar el movimiento de bajo nivel del robot ROJO, esto es, el control del volante para el giro y del pedal del embargue para la marcha y parada del vehículo. Se describe el sistema sensorial incorporado en el robot para la tarea de la localización, y que incluye un sistema odométrico como sensor interno y un receptor GPS diferencial como sistema de posicionamiento global. Se detalla la arquitectura jerárquica diseñada basada en una estructura cliente-servidor para el acceso tanto a los dispositivos sensoriales como a los de actuación. Por último, se describe un modelo cinemático del vehículo conocido como el de la bicicleta y su aplicación al robot ROJO.

El capítulo 5, titulado *Localización precisa en exteriores*, está dedicado al estudio de la localización y análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de la posición para un vehículo de exteriores. Se describe un modelo de la incertidumbre asociada a la estimación de la posición realizada por los sensores a bordo del robot. A continuación, se desarrollan los algoritmos para la fusión de la información obtenida por un conjunto cualesquiera de sensores atendiendo a la naturaleza del error asociado a cada uno de ellos. Seguidamente, se estudia para el sistema sensorial de posicionamiento incorporado en el robot ROJO, la naturaleza del error asociado a cada uno de los sensores. Con esta información, se particulariza el algoritmo de fusión al sistema sensorial propio del robot que permite obtener la mejor estimación de la posición del

vehículo y la incertidumbre asociada a esta estimación conjunta como indicador de la fiabilidad de la posición calculada. Se presenta, además, el desarrollo del agente de comportamiento VE A PUNTO de la arquitectura AMARA que, combinando los agentes de movimiento elementales *avanza "d"metros, gira "φ"grados a la derecha, gira "φ"grados a la izquierda* con el conocimiento preciso de la posición obtenido mediante la integración sensorial propuesta, permita al tractor ROJO alcanzar un punto del escenario de trabajo definido por el usuario. Se presentan los resultados experimentales obtenidos sobre el robot ROJO.

El capítulo 6, denominado *Conclusiones y líneas de futuros desarrollos*, resume el trabajo realizado en esta tesis, detalla las conclusiones de los resultados obtenidos y propone diversas líneas de trabajo futuro.

Cuatro apéndices completan esta tesis.

En el apéndice A, denominado *Descripción de los receptores GPS empleados*, se describen los distintos receptores GPS con los que se ha trabajado en esta tesis y los mensajes del protocolo NMEA utilizados para la comunicación entre el receptor y el usuario.

En el apéndice B, titulado *El sistema GPS en posicionamiento autónomo*, presenta un estudio experimental del GPS posicionando en autónomo, esto es, sin corrección diferencial, antes del cese de la Disponibilidad Selectiva y tras su eliminación. Se analiza la influencia que determinados parámetros poseen en la precisión de las medidas: geometría de los satélites, el número de satélites empleados en los cálculos de posición, etc.

El apéndice C, que lleva por título *Sistemas de coordenadas para posiciones GPS*, presenta el sistema de coordenadas geodésico de longitud-latitud y las proyecciones cartesianas UTM (*Universal Transverse Mercator*) para la representación de las posiciones GPS y que han sido empleados en esta tesis.

En el apéndice D, titulado *Arquitectura cliente-servidor en el robot ROJO*, se describen las funciones implementadas en el programa servidor a bordo del robot y en el programa cliente, así como el conjunto de mensajes que se han definido para el envío de órdenes e información entre ambos módulos.

Capítulo 2

La robótica móvil en exteriores

2.1 Introducción

Este capítulo presenta un recorrido en la evolución experimentada por la Robótica, desde los primeros manipuladores industriales hasta los modernos robots móviles de exteriores encargados de desarrollar tareas tediosas, peligrosas o imposibles para el hombre. Se presenta el problema de la localización precisa como primera tarea a resolver por el controlador del robot para culminar con éxito la misión a él encomendada. Se describen las distintas técnicas explícitas y las basadas en la percepción del entorno que permiten estimar la posición de un robot móvil, haciendo especial énfasis en la problemática del posicionamiento en exteriores. Finalmente, se realiza una revisión bibliográfica de las principales aplicaciones de los robots móviles de exteriores que han ido apareciendo a lo largo de la historia de la Robótica Móvil.

2.2 Evolución hacia la robótica móvil

En el término robot confluyen las imágenes de máquinas controladas por ordenadores para la realización de trabajos productivos y de imitación de movimientos y comportamiento de seres vivos.

Los robots actuales son obras de ingeniería y como tales concebidas para producir bienes y servicios o explotar recursos naturales. Desde esta perspectiva, son máquinas con las que se continúa una actividad que parte de los propios orígenes de la humanidad, que posteriormente es dirigida por la organización social y los procesos de división del trabajo, y que desde la Edad Moderna se fundamenta en conocimientos científicos.

Los robots tuvieron su primera aplicación en el ámbito industrial y su finalidad era la sustitución del operador humano por un sistema artificial en la ejecución de una tarea física. Así, los robots

industriales consistían básicamente en brazos articulados, esto es, manipuladores de carácter multifuncional diseñados para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos absolutamente definidos y fijos, primando la repetibilidad y la precisión sobre la adaptación y la flexibilidad.

El desarrollo de los robot móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica, restringido inicialmente a una estructura mecánica fija al suelo. Se trata también de incrementar la autonomía, limitando todo lo posible la intervención humana. El grado de autonomía de un robot móvil depende, en gran medida, de la facultad del robot para abstraer el entorno y convertir la información obtenida en órdenes, de modo que, aplicadas sobre los actuadores del sistema de locomoción, garantice la realización eficaz de su tarea. Así, las principales diferencias que alejan a un robot móvil autónomo de otro tipo de vehículos son las siguientes:

- Percepción, que determina la relación del robot con su entorno de trabajo mediante el empleo de sensores adecuados.
- Razonamiento, que determina las acciones que debe realizar en cada momento, según el estado del robot y de su entorno, para alcanzar los objetivos propuestos.

Los primeros vehículos autónomos comenzaron a aplicarse en la industria a partir de los años 60. Estos vehículos estaban guiados por cables bajo el suelo o mediante sensores ópticos para seguir líneas trazadas en la planta. Ante cualquier cambio inesperado en el entorno de trabajo que afectara al desarrollo normal de la navegación, el vehículo se encontraba imposibilitado para la ejecución de acciones alternativas para poder continuar su labor. Por otro lado, el cambio en la trayectoria del vehículo implica modificar la infraestructura del entorno con nuevos tendidos de cables o marcas ópticas. No obstante, estas aplicaciones son, hoy en día, comunes en muchos procesos de fabricación, donde el entorno de trabajo se encuentra fuertemente estructurado.

En los años 70 se comienza a trabajar en el desarrollo de robots móviles dotados de una mayor autonomía. En los años 80, con el incremento espectacular de la capacidad computacional y el desarrollo de nuevos sensores, mecanismos y sistemas de control, esta autonomía se consigue en mucho mayor grado. Se trata de que el robot tenga la suficiente inteligencia como para reaccionar y tomar decisiones basándose en observaciones de su entorno, que no tiene por qué ser perfectamente conocido.

La autonomía del robot es una de las cualidades más difíciles de conseguir, sobre todo cuando se pretende lograr en entornos dinámicos. A ello se unen los problemas derivados de las imprecisiones en la información que el sistema sensorial del robot adquiere del entorno. Por ello, características importantes del sistema sensorial son la flexibilidad y la capacidad de adaptación

a la tarea específica que el robot esté realizando y a las condiciones del entorno por el que se mueve, así como la resistencia a imperfecciones y fallos en los propios componentes.

El descubrimiento del gran potencial de los robots móviles hace que su labor no se limite a las fábricas, sino que extienda su campo de aplicación a otros sectores tales como la agricultura o el sector servicios. Comienza así a aparecer el concepto de robot móvil de exteriores frente a los robots móviles de interiores. Hoy en día ya se emplean robots móviles en labores de limpieza, transporte, vigilancia, seguridad, etc., así como en la automatización de trabajos peligrosos o de aquellos que resulten imposibles para el hombre, tales como la exploración planetaria o trabajos submarinos.

Fruto de esta nueva perspectiva que ha adquirido la robótica, las líneas de investigación actuales se dirigen a profundizar en el estudio y desarrollo de nuevos prototipos robotizados orientados a estas y otras aplicaciones, así como técnicas de posicionamiento, control y percepción del entorno, con especial énfasis en entornos naturales. Se requieren, además, herramientas formales que integren la información obtenida por los diferentes sensores del robot para satisfacer criterios de eficiencia, flexibilidad y capacidad de reacción ante contingencias no previstas. En definitiva, conseguir con éxito la navegación del robot móvil y, con ello, la ejecución de su tarea.

2.3 La robótica móvil: hacia los sistemas autónomos

Sin lugar a dudas, la Robótica Móvil es la rama de la Robótica que ha experimentado un mayor desarrollo a lo largo de los últimos años. Surge, por un lado, de la necesidad de aumentar el campo de aplicación de los robots, tradicionalmente fijos o semifijos en el suelo y que reducía su capacidad a un entorno de trabajo muy limitado y, por otro lado, de incrementar su autonomía, evolucionando desde la teleoperación y telepresencia a sistemas "inteligentes".

Son dos las motivaciones para el desarrollo de robots móviles autónomos: la motivación científica y la motivación ingenieril [Thorpe 90]. La primera de ellas atiende a aspectos teóricos y la segunda a aspectos prácticos. Así, el objetivo científico, amplio y ambicioso, consiste tanto en el entendimiento de la inteligencia de los seres vivos como en la aplicación de los conocimientos adquiridos de la naturaleza al conocimiento, diseño y mejora de los sistemas artificiales. Desde el punto de vista de la ingeniería, el objetivo consiste en construir sistemas útiles capaces de realizar tareas tediosas, molestas, difíciles, peligrosas o imposibles para el hombre.

Los robots móviles se corresponden con sistemas que resuelven problemas en el ámbito del mundo real. La construcción de prototipos reales exige un importante esfuerzo económico y humano a lo largo de un tiempo considerable. Este esfuerzo representa el deseo de convertir en útiles teorías

desarrolladas y probadas en el laboratorio. Sólo mediante la realización de robots móviles que solucionen problemas reales se puede afianzar y avanzar en los conocimientos sobre vehículos autónomos.

Las bases de conocimiento necesarias para abordar el campo de los robots móviles son muy amplias. Así, en el diseño y construcción de un robot móvil se necesitan integrar técnicas procedentes de disciplinas muy diversas como mecánica, electrónica, informática, control, etc. Las entradas al sistema de control del robot suelen estar con frecuencia planteadas de forma heurística más que seleccionadas con criterios de optimización analítica. En numerosas ocasiones, ya sea por requerimientos temporales o de precisión, se busca satisfacer ciertos objetivos más que optimizarlos.

Un robot móvil tiene como elemento básico un vehículo que desarrolla su tarea moviéndose en un entorno del que sólo conoce con antelación sus características generales. Aunque desde el punto de vista de la movilidad, los vehículos robóticos pueden ser terrestres, marinos o aéreos, la mayor parte de los trabajos se han realizado con robots terrestres para interiores. Sin embargo, en los últimos años, las aplicaciones en exteriores y la robótica submarina están cobrando el mayor protagonismo.

Los vehículos automáticos submarinos [Yuh 99] [Whitcomb 99] y aéreos [Miller 98] [Miller 99] [Montenegro 99] [Sugeno 99] son típicamente adaptaciones de vehículos convencionales pilotados por hombres. En vehículos terrestres puede distinguirse entre sistemas de locomoción mediante ruedas, cadenas, patas y cuerpos articulados similares a las serpientes.

Un vehículo provisto de ruedas es la solución más simple y eficiente para conseguir la movilidad en superficies "de laboratorio" suficientemente libres de obstáculos. En aplicaciones de interiores, los robots dotados de tres ruedas (que permiten el giro sobre sí mismos) y con estructura cilíndrica¹, cuyo precedente se sitúa en el CMU ROVER [Moravec 85], constituyen la plataforma básica de experimentación donde los investigadores prueban sus ideas, si bien no van destinados a una aplicación determinada. Robots con tales características son ALLEN [Brooks 86a] [Brooks 86b] [Brooks 91] [Flynn 88] y HERBERT [Connel 90b], ambos del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y GEORGE [Arkin 87] [Arkin 89] del Instituto Tecnológico de Georgia, entre otros. Otros robots comerciales de interiores, tales como NOMAD-200 de la empresa *Nomatic Technologies* y B.21 de *Real World Interface* emplean también esta estructura.

En aplicaciones terrestres de exteriores, sin embargo, es frecuente la modificación de vehículos convencionales, tales como automóviles o camiones [Waxman 87] [Thorpe 98] [Pomerlau 93] [Heredia 99] [Reyes 99]. Para la navegación campo a través también se emplean vehículos todo-

¹Estos robots se engloban bajo el término de holonómico, calificativo dado a aquellas plataformas que permiten alcanzar una determinada posición y una orientación en el plano mediante un único movimiento.

terreno o tractores con ruedas [Schönberg 95] [Jarvis 95] [Elkaim 96] [Marchant 97a] [Caracciolo 99] [Pozo-Ruz 01a] [Garcia-Alegre 01] o pistas de deslizamiento [Rintanen 96] [Pedraza 00]. Si el vehículo está provisto de ruedas, el control de la dirección es simétrico, esto es, se realiza al ordenar un determinado ángulo a las ruedas directrices. En el caso de disponer de cadenas, el control de dirección es asimétrico y se consigue al ordenar una velocidad diferente a la cadena derecha e izquierda y de sentido contrario. Quizás, el trabajo más significativo en navegación de robots terrestres de exteriores es el realizado en la Universidad de Carnegie Mellon por Pomerlau [Pomerlau 93], si bien tiene precedentes directos en los trabajos de [Waxman 87] y [Thorpe 88]. El robot empleado por Pomerlau, el CMU NAVLAB, consistía en una furgoneta automatizada capaz de alcanzar una velocidad de 90 km/h, frente a los 3 km/h que alcanzaba la de Waxman.

Los robots con patas [Kumar 89] [Raibert 89] [Brooks 90] [Raibert 93] [Simsarian 95] [Grieco 98] presentan ciertas ventajas respecto a los robots con ruedas. Así, son capaces de moverse por un terreno desigual y alcanzar zonas inaccesibles para los robots con ruedas. Como desventaja, el control y la coordinación de las patas para lograr el desplazamiento del robot son extremadamente complejos. Otro problema es la asignación del número mínimo de patas para establecer un compromiso óptimo entre aspectos tales como la estabilidad y la coordinación, si bien varios estudios han definido como seis el número óptimo de patas para cumplir tales criterios. Existen también sistemas mixtos de locomoción, con ruedas para terrenos lisos y patas para salvar obstáculos, subir escaleras, trepar, etc. Por regla general, los robots con patas construidos hasta el momento han sido voluminosos y lentos, y sólo resultan útiles como vehículos reales en aplicaciones muy concretas.

Las configuraciones articuladas son apropiadas para caminos estrechos y terrenos muy irregulares a los que puede adaptarse de forma activa el robot [Henning 98]. La seguridad del funcionamiento puede ser mayor debido a la redundancia de su estructura. Las configuraciones articuladas son aún más recientes y su aplicación fuera de los laboratorios de robótica requiere todavía progresos para dotarlas de suficiente autonomía y resolver los complejos problemas de control que presentan.

El grado de autonomía de un robot móvil se mide por la capacidad del robot de percibir y modelar su entorno, de planificar y ejecutar sus objetivos por sí mismo sin intervención humana. Por ello, la autonomía de un robot móvil ha evolucionado en la medida en que el estado del arte de la inteligencia artificial ha permitido dotar al robot de una capacidad de percepción, razonamiento, decisión y planificación cada vez mayor.

Desde el punto de vista de la autonomía, los robots móviles han evolucionado desde los prototipos teleoperados hasta los robots "inteligentes". Si se trata de robots fijos, existe también el calificativo de repetitivo, donde se engloban la mayor parte de los que se emplean en cadenas de

producción industrial. En ellos, las tareas son predecibles e invariantes, con una limitada percepción del entorno. Son precisos, de alta repetibilidad y relativamente rápidos e incrementan la productividad ahorrando al hombre trabajos repetitivos y eventualmente penosos.

En los robots teleoperados las tareas de percepción, planificación y manipulación son realizadas por humanos, es decir, el operador actúa en tiempo real cerrando el bucle de control. Los sistemas evolucionados suministran al operador realimentación sensorial del entorno (imágenes, distancias, esfuerzos, etc.). Esto es lo que se conoce como telepresencia. Estos robots son interesantes en los trabajos en los que se necesitan alcance (acceso difícil, medios contaminados y peligrosos), en tareas difíciles de automatizar y en entornos no estructurados. La tendencia de los últimos años se dirige a hacer recaer en el hombre únicamente las tareas que requieren toma de decisiones en situaciones críticas en función de la información sensorial, experiencia y habilidad, funcionando de forma autónoma, esto es, independientemente de las decisiones humanas, en condiciones normales [Bejcz 91]. Algunos robots móviles, en especial aquellos de exteriores destinados al desempeño de una tarea muy específica que pueda entrañar riesgos (desactivación de explosivos, limpieza de terrenos contaminados, etc.) o bien que resulten imposibles para el hombre (exploración extraterrestre, submarina, etc.), emplean este tipo de robots semi-teleoperados.

Los robots autónomos o "inteligentes" son los más evolucionados desde el punto de vista del procesamiento de información. Son máquinas capaces de percibir, modelar el entorno, planificar y actuar para alcanzar objetivos sin intervención o con una intervención muy pequeña de supervisores humanos. Pueden trabajar en entornos poco estructurados y dinámicos tomando acciones en respuesta a contingencias variadas en dicho entorno. Para ello, requieren la utilización de sensores que proporcionen información del entorno. Debe existir, por tanto, un lazo cerrado entre los sistemas sensoriales y los actuadores para que las acciones efectuadas puedan cambiar según lo percibido en cada momento [Kaiser 95].

El sistema de percepción de un robot móvil tiene un triple objetivo: estimar la posición del vehículo de forma precisa, modelar el entorno, construyendo un mapa o representación del escenario de trabajo, y permitir una navegación segura, detectando y localizando obstáculos y situaciones peligrosas en general. Cada una de estas tareas requiere diferente procesamiento. Así, en la estimación de la posición y actualización (o construcción) del mapa del entorno priman la precisión, resolución espacial, alcance, etc. En la detección de obstáculos, sin embargo, el tiempo entre observaciones debe ser generalmente mucho menor, resultando vital el disponer de la información ya procesada lo más rápidamente posible.

Debido a la diferente naturaleza de los procesamientos requeridos, un robot móvil rara vez va equipado con un único sensor para la realización de todas estas tareas, al contrario, la práctica más habitual consiste en combinar dentro del sistema sensorial varios sensores que, en mayor o

menor medida, se complementan. A veces, con objeto de reducir la incertidumbre o simplemente validar la información adquirida, se emplean varios sensores redundantes, siendo necesario, en tal caso, recurrir a mecanismos de fusión de datos que permitan integrar conjuntamente la información obtenida de cada uno de estos sensores.

Los sensores que utiliza el robot pueden ser una fuente de problemas debido a las imprecisiones en la información que devuelven del entorno. El sistema debe tener en cuenta esta peculiaridad, adaptando la configuración sensorial a los requisitos de cada tarea específica y a las condiciones del entorno [Dorigo 96]. Cuanto mayor sea la complejidad del sistema sensorial empleado mayor será el tiempo requerido para procesar la información y tomar decisiones. Por ello, resulta interesante conseguir una configuración sensorial que permita obtener únicamente la información necesaria para la realización de la tarea requerida.

Al tratarse de robots móviles autónomos, el conocimiento de su posición de forma continua y en tiempo real es, sin duda, uno de los aspectos más importantes de la navegación. Esto permite, entre otras tareas, planificar caminos, generar trayectorias, evitar obstáculos, monitorizar la ejecución de movimientos, etc.

En general, el conocimiento de la posición del vehículo no resulta sencillo de resolver y se vuelve especialmente problemático en aquellos robots que realizan su actividad en entornos naturales, debido fundamentalmente a la ausencia de referencias.

En los últimos años se han propuesto una gran variedad de técnicas encaminadas a dotar al robot móvil de un sistema que le permita conocer la posición en la que se encuentra en cada momento respecto a un sistema de referencia absoluto [Urdiales 99]. Éstas varían de forma considerable en función del entorno en el cual se mueve el robot, del conocimiento que se tenga del mismo, de la tarea que realiza y del sistema sensorial con que el robot va equipado.

A continuación se presenta una revisión de las distintas técnicas para estimar la posición de un vehículo autónomo, las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas y su adecuación a los diferentes escenarios por los que se mueve el robot.

2.4 Revisión de los métodos para la estimación de la posición de un robot móvil

Las técnicas empleadas en la estimación de la posición de un robot móvil pueden dividirse en dos grandes grupos [González 96]. Dentro del primer grupo se engloban las técnicas de estimación explícitas, que proporcionan la posición y orientación del robot de forma directa a partir de las medidas efectuadas. En el segundo grupo se encuentran los estimadores basados en la percepción

del entorno que, mediante el empleo de sensores que suministran información sobre el escenario en el que el robot se mueve, obtienen la posición del vehículo mediante la comparación de ésta con otros datos o modelos conocidos: mapas, marcas, etc.

2.4.1 Estimación explícita de la posición

Estimación explícita basada en medidas internas

La forma más simple de estimar la posición y orientación de un robot móvil consiste en integrar la trayectoria recorrida por éste a partir de una serie de medidas internas: vueltas dadas por las ruedas, velocidades, aceleraciones, cambios de orientaciones, etc. En función de la información que se utilice, pueden distinguirse entre los sistemas odométricos y los de navegación inercial.

La odometría es un método simple y de bajo coste. Es una técnica muy antigua que se remonta a la época de Arquímedes y que tiene por objetivo estimar la posición y orientación de un vehículo a partir del número de vueltas dadas por sus ruedas. Para llevar a cabo la cuenta del número de vueltas (y fracciones de ésta) se utilizan codificadores ópticos, magnéticos, capacitivos o inductivos de elevada precisión montados sobre los ejes [Martínez 94]. Generalmente, un odómetro genera un pulso cada 20-30 cm del perímetro de rueda, por lo que multiplicando el número de pulsos por el factor de escala del sensor se obtiene la distancia viajada. Sin embargo, este factor de escala no es constante, pues depende del radio de las ruedas que cambia con la presión de los neumáticos, con la temperatura o con la velocidad del vehículo.

En general, todas las fuentes de error que causan imprecisiones en las medidas de los odómetros pueden dividirse en errores sistemáticos y errores no sistemáticos.

Los errores sistemáticos son especialmente importantes porque se acumulan de forma constante. Son específicos de cada vehículo ya que son causados por imperfecciones en su diseño mecánico y sensorial. Como estos errores son prácticamente constantes o bien evolucionan según una ley conocida, pueden eliminarse mediante un adecuado proceso de calibración [Borenstein 96].

Los errores no sistemáticos son debidos básicamente a la interacción del vehículo con el entorno y a las condiciones por las que éste se mueve, resultando especialmente importantes cuando la superficie de movimiento es irregular. Sin embargo, el empleo de sensores redundantes podría reducir de forma significativa estos errores.

Así, los errores sistemáticos son debidos, entre otras causas, a:

- los diámetros diferentes de las ruedas izquierda y derecha, que causará un ligero giro cuando se piense que se está moviendo en línea recta,

- los desajustes en el alineamiento de las ruedas,
- la existencia de más de un punto de contacto entre la rueda y el suelo,
- el grado de resolución del odómetro,
- la frecuencia de muestreo del sensor.

Entre los errores no sistemáticos se encuentran:

- el movimiento sobre suelos no llanos,
- las irregularidades en el perfil de contacto rueda-suelo,
- el deslizamiento de las ruedas,
- las variaciones en la carga transportada por el vehículo.

Otra técnica de estimación explícita de la posición son los sistemas de navegación inercial (INS, *Inertial Navigation System*). Estos sistemas incluyen acelerómetros y giróscopos. Mediante los primeros se obtiene la aceleración del vehículo y con los segundos la velocidad de giro del robot móvil. La doble integración de las aceleraciones permite obtener una estimación de la posición.

La precisión del acelerómetro es crítica ya que, al integrar dos veces las aceleraciones, incluso pequeños errores cometidos por aquél repercuten notablemente en la posición estimada. En vehículos que se mueven a velocidades moderadas, las aceleraciones a las que se ve sometido el robot móvil resultan muy pequeñas, por lo que se necesitan aparatos de medida muy sensibles y de elevado precio para captarlas.

Para medir los ángulos de orientación se integran las medidas proporcionadas por los giróscopos. Éstos pueden ser mecánicos (masa giratoria) u ópticos (de anillo láser o de fibra óptica). Es posible medir también el ángulo de giro mediante el empleo de brújulas o buscadores de norte [Pedraza 97]. A diferencia de los sistemas odométricos, los sistemas de navegación inercial no se ven afectados por los problemas derivados de la interacción del vehículo con el suelo. Son además más fiables y precisos que los basados en la odometría.

Como contrapartida, la utilización de sistemas de navegación inercial se encuentra bastante limitada, ya que resultan difíciles de calibrar. Por otro lado, la suspensión y la inclinación del vehículo influyen de forma muy decisiva en las medidas realizadas, por lo que se precisaría corregir sus efectos considerando la inclinación lateral y longitudinal del robot móvil mediante inclinómetros. Además, esta forma de estimar la posición resulta inexacta debido a que no se

dispone de un registro continuo en el tiempo. En lugar de ello, se cuenta con una medida de las aceleraciones en cada periodo de muestreo. Por otro lado, son más caros y frágiles que los sensores odométricos.

Tanto la odometría como los sistemas de navegación inercial son relativamente fáciles de implantar, pero presentan un grave inconveniente como estimadores de la posición absoluta: los errores se van acumulando y, por tanto, la incertidumbre experimenta un aumento conforme el vehículo se mueve. Por este motivo, ambos sistemas no suelen emplearse en solitario, sino que se complementan con algún sistema de posicionamiento que reduzca de forma periódica dicha incertidumbre [Watanabe 90]. En este sentido, las estimaciones mediante medidas internas juegan un doble papel. Por un lado, proporcionan de forma continua estimaciones relativas a la última localización absoluta calculada y, por otro, sirven como primeras aproximaciones para el segundo estimador.

Estimación explícita mediante balizas

Este tipo de sistemas permite determinar la posición del vehículo mediante el emplazamiento en el escenario de navegación de un determinado número de balizas cuya posición es conocida. Aunque puede entenderse que este proceso conlleva la percepción del entorno, la posición no se estima a partir del análisis o interpretación de éste, sino que es determinada de forma directa mediante un proceso más o menos complejo de triangulación, bien a partir de medidas de distancias, bien de ángulos o bien mediante combinaciones de los dos [Betke 97].

En cuanto a la implantación física de este tipo de sistema de posicionamiento existen diferentes configuraciones como resultado de combinar distintas clases de sensores y balizas. Una posibilidad es dotar al vehículo de un receptor giratorio que rastree el entorno en busca de señales emitidas por las balizas. Así, conocida la velocidad de giro del receptor óptico, el sistema determina los ángulos entre balizas consecutivas a partir del tiempo que transcurre entre las detecciones de éstas. La posición del robot se estima a partir de estos ángulos mediante relaciones trigonométricas, mientras que la orientación se obtiene midiendo el ángulo entre cualquiera de las balizas del entorno y otra situada a bordo para tal fin.

Una configuración diferente consiste en situar en el entorno un conjunto de marcas especiales como señales luminosas, códigos de barras, etc., y dotar al vehículo de una o varias cámaras que exploren el entorno en busca de éstas.

La precisión y fiabilidad de este tipo de estimación depende fundamentalmente de la señal empleada (infrarrojos, láser, ultrasonidos, etc.), de las características del sensor y del número de balizas emplazadas en el espacio de trabajo. Las principales desventajas radican tanto en

la necesidad de configurar apropiadamente el entorno de trabajo como de garantizar que un suficiente número de estas señales quede en todo momento libre de oclusiones y dentro del campo visual del sensor. También deben tenerse en cuenta los problemas que pueden originar las condiciones ambientales de iluminación y ruido, ya sea acústico, electromagnético, o de cualquier otra naturaleza. Todo ello impide la utilización de esta técnica en entornos muy dinámicos o no estructurados.

Un sistema que puede considerarse incluido dentro de la estimación mediante balizas es el sistema de posicionamiento global mediante satélites (GPS), desarrollado en la década de los noventa por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares. Aquí las balizas son un conjunto de satélites que orbitan la Tierra a gran altura y que emiten señales de radio a los receptores en tierra [Hurn 89].

Entre las ventajas del GPS se encuentran su capacidad para proporcionar posiciones las 24 horas del día, sin coste de uso y de forma instantánea. El GPS no se ve afectado por condiciones del entorno tales como luz insuficiente y, como las balizas son satélites en el espacio, no requieren modificar el entorno. Más aún, al ser un sistema de posicionamiento global el error asociado a las medidas no crece ni con el tiempo ni con la distancia recorrida por el vehículo, como ocurría con los odómetros.

Para el cálculo de posiciones, el GPS requiere divisar cielo abierto. En ocasiones, árboles, edificios o tendidos eléctricos obstaculizan la señal GPS, impidiendo el cálculo de la posición. Incluso si la señal GPS estuviera disponible, la precisión se ve afectada por diversas fuentes de error. Hasta mayo de 2000, la principal fuente de error que afectaba a las señales transmitidas por los satélites era la denominada disponibilidad selectiva (*S/A*, *Selective Availability*), que consistía en una degradación intencionada de la señal civil por parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos y que provocaba un error en las medidas de 100 metros. La orden del presidente de los Estados Unidos para el cese de la disponibilidad selectiva [White House 00] ha mejorado la precisión en aplicaciones civiles en un factor de diez, si bien sigue reservándose una mejor exactitud del sistema para uso exclusivo militar.

A pesar del cese de la S/A, la precisión que en modo absoluto ofrecen los GPS resulta insuficiente en muchas aplicaciones. Para ello, se emplean las denominadas técnicas diferenciales, donde pueden obtenerse en tiempo real precisiones de pocos centímetros y en postproceso precisiones de milímetros.

Por su interés y reciente uso, se dedica el apéndice A de esta tesis a la descripción detallada del estado del arte de este importante sistema de posicionamiento.

2.4.2 Estimadores basados en la percepción del entorno

Una alternativa a los sistemas de estimación explícita de la posición consiste en dotar al robot móvil de un sistema sensorial capaz de proporcionar suficiente información del entorno para situar al vehículo. La localización se determina a través del emparejamiento de datos extraídos del entorno por el sistema sensorial con datos previamente conocidos acerca de éste.

Para el diseño de los sistemas de percepción es necesario tener en cuenta diferentes criterios, algunos de los cuales resultan conflictivos entre sí. De esta forma, se requiere considerar la velocidad del robot, la precisión, el alcance, la posibilidad de interpretación errónea de datos y la propia estructura del entorno. Se describen aquí los principales sensores utilizados para la estimación de la posición basados en la percepción del entorno, dividiéndolos en sensores activos y pasivos.

Los sensores activos son aquellos que emiten algún tipo de energía al medio: luz infrarroja, ultrasonidos, luz láser, etc. Los sensores pasivos, por el contrario, se limitan a captar la energía ya existente en el medio. De este tipo son las cámaras de vídeo CCD, las cuales perciben el entorno a través de la cantidad de luz que les llega procedente directamente de fuentes luminosas o bien a través de reflexiones en los objetos del entorno.

Sensores activos

Entre los sensores activos, los más empleados son los sónares y los sensores láser.

Los sónares, también denominados sensores de ultrasonidos, son los más económicos y simples de entre la amplia gama de sensores empleados en navegación. Se basan en la determinación del tiempo de vuelo de un pulso de sonido. Las dos configuraciones más empleadas en robots móviles son el anillo de sónares y el dispositivo de rastreo radial. Como principales ventajas caben destacar su bajo coste y su simplicidad. Sin embargo, resultan muy vulnerables a reflexiones especulares y a las texturas de las superficies. El ángulo de orientación es un parámetro muy crítico para estos sensores, resultando poco fiables los datos procedentes de planos que forman un ángulo mayor que 15 grados [Pozo-Ruz 97]. Además, se encuentran influenciados por las condiciones ambientales, si bien este hecho puede corregirse mediante una calibración adecuada.

La percepción activa mediante sensores láser es también un método muy empleado en robots móviles [González 92]. Se utilizan dispositivos mecánicos y ópticos de barrido en el espacio, obteniéndose imágenes de distancia y reflectancia a las superficies intersectadas por el haz. Pueden encontrarse diversos sistemas cuyas medidas se basan en el tiempo de vuelo de la señal o en la modulación de amplitud.

Existen problemas de calibración derivados del intervalo de ambigüedad asociado a la modulación de amplitud, así como de fiabilidad, originados por la sensibilidad de los componentes mecánicos a las vibraciones y por la propia resolución del sistema de posicionamiento. Por otra parte, la distancia puede llegar a depender de la temperatura y del material de la superficie reflectante y presentar reflexiones especulares. También, en los límites de las superficies intersectadas por el haz, la interpretación de los datos puede ser confusa. Además, la precisión de la medida depende de la distancia a la que se encuentre la superficie.

Sensores pasivos

Las cámaras de vídeo son, sin duda, los sensores más empleados en percepción, gracias a las numerosas ventajas que presentan como su tamaño y precio, no siendo necesario, en principio, el empleo de dispositivos mecánicos para la captación de la imagen. Sin embargo, varios problemas limitan su utilización en muchas de las aplicaciones de los robots móviles. Entre ellos cabe citar el alto coste computacional y la lentitud de procesamiento, debido al elevado volumen de información que hay que procesar para obtener una referencia significativa. Recientemente están adquiriendo gran popularidad las técnicas de visión foveal, que reducen de forma importante la información a procesar [Camacho 98] [Arrebola 98]. Otro problema es la dependencia de estos sensores de las condiciones ambientales de iluminación, complicando de forma especial su empleo en escenarios de exteriores.

Las técnicas empleadas para estimar la posición con cámaras de vídeo son variadas, si bien pueden establecerse dos categorías:

- La primera categoría comprende todas aquellas técnicas basadas en la obtención de profundidad (distancia) a objetos del entorno. Aquí se incluyen la visión estéreo y la estimación de movimiento a partir del flujo óptico. En ambos casos se recurre a operadores que primero localizan en las imágenes un número más o menos reducido de características que posteriormente son emparejadas con la ayuda de un conjunto de restricciones, ya sean geométricas, físicas, del entorno, etc.
- La segunda categoría comprende técnicas basadas en modelos del entorno, donde la estimación de la posición se lleva a cabo a partir del emparejamiento de características extraídas de la imagen con el modelo conocido. Los resultados obtenidos con estas técnicas dependen fuertemente de la calidad de la imagen, del número de características extraídas, de la exactitud del mapa utilizado y, sobre todo, del tipo de escenario.

2.4.3 Sistema sensorial para el posicionamiento en exteriores

La estimación de la posición de un vehículo en un entorno de exteriores resulta bastante compleja y requiere elegir de forma adecuada los sensores a emplear. Por un lado, los errores en el reconocimiento del entorno y en la localización crecen debido a la variabilidad de las condiciones ambientales: iluminación, corrientes de aire, etc., y a la ausencia de referencias en estos escenarios, lo que hace difícil el empleo de sensores de ultrasonidos, láser o cámaras de vídeo para la localización del robot. En exteriores, tales sensores resultan útiles para el desempeño de otras tareas como la evitación de obstáculos [Du 95] [Martínez 98], seguimiento de un camino [Du 95] [Marchant 97a] [Martínez 98] [Dellaert 98] [Sanchiz 98], o el reconocimiento de objetos, tales como la detección de malas hierbas en una zona de cosechas [Marchant 97b].

Por otro lado, la propia naturaleza de los terrenos naturales como suelo de grava o tierra, fuertes pendientes, piedras, etc., y la amplitud de los recorridos a realizar por el vehículo, hace que las posiciones calculadas por los sensores internos, ya sea por la odometría o por sistemas de navegación inercial, que incorpora giróscopos y acelerómetros para la estimación de la posición y velocidad del robot previa integración de la información aportada, lleven asociada una incertidumbre que crece a medida que el vehículo avanza.

En aplicaciones de exteriores de robots móviles, las cuales se realizan a cielo abierto, resulta ventajoso el empleo del GPS. La utilización del GPS en vehículos terrestres data de la década de los noventa. Actualmente su uso se encuentra bastante extendido, ya sea como asistente en el control del guiado del vehículo o como herramienta básica en la navegación autónoma del mismo [Vetter 95] [Rintanen 96] [Jarvis 95] [Aono 98] [Reyes 99] [Cordesses 99] [Pozo-Ruz 01a].

Entre las bondades de este sistema para el posicionamiento de vehículos en exteriores cabe citar que, al ser el GPS un sistema de posicionamiento global, el error que se comete en los cálculos se encuentra acotado y no depende de la distancia recorrida por el vehículo. Además, no se ve afectado por condiciones ambientales tales como una iluminación insuficiente y, al contrario de lo que ocurre con las cámaras de vídeo o sensores láser, no obtiene información que necesite un exhaustivo filtrado. Al emplear como balizas un conjunto de satélites en el espacio, no requiere modificar el entorno de trabajo. Sin embargo, si se necesitan precisiones por debajo de 15 m. hay que recurrir a técnicas diferenciales, capaces de reducir el error en el cálculo de la posición en el intervalo entre 5 m. y pocos centímetros en tiempo real. Si se desean errores del orden de milímetros se precisan técnicas de postprocesado. El precio del equipo aumenta de forma exponencial con la mejora de la precisión.

Pero no sólo el coste asociado a un receptor GPS puede ser en algunos casos un problema; si se desea tener una localización continua del vehículo en tiempo real existen limitaciones impuestas

por la propia filosofía de funcionamiento del sistema. Así, para obtener posiciones, el receptor GPS necesita disponer de la señal de al menos cuatro satélites. Este requerimiento en algunos casos resulta imposible, ya que la señal puede encontrarse apantallada por obstáculos como árboles, montañas o tendidos eléctricos.

Por tanto, aunque se empleen en el posicionamiento sensores GPS diferenciales muy precisos, para realizar una navegación segura se requieren de otros sensores redundantes y complementarios que compensen en la medida de lo posible dichas faltas [Luo 89]. Sensores redundantes son aquellos que ofrecen, por vías diferentes, información acerca de una misma magnitud. Con el término complementario no sólo se hace referencia al hecho de que cada uno de los sensores abarca una parte del dominio de observación, sino que la correlación, en términos del error estimado, es negativa. Una correlación negativa implica que cuando el error estimado por uno de los sensores complementarios decrementa, el error estimado por el sensor complementario se incrementa, y viceversa.

Según lo expuesto anteriormente, cada uno de los sensores a bordo del robot móvil ofrecerá su propia estimación del parámetro o parámetros de la posición (coordenadas en el espacio y orientación). Esta información, tras un proceso de cálculo, ofrece una única solución considerada como la mejor estimación de la localización del vehículo [Kam 97].

Son varios los sensores que pueden emplearse conjuntamente con el GPS para posicionar con precisión un vehículo en un entorno de exteriores. En ocasiones se emplean, junto al GPS, las medidas proporcionadas por un sistema odométrico [Molina 00] [Pozo-Ruz 01a], un sistema de navegación inercial [Sasiadek 99] o bien una combinación de ambos [Abbott 98] [Pozo-Ruz 00b] [Pozo-Ruz 00c].

Entre las técnicas que pueden emplearse para realizar la fusión de medidas sensoriales destacan el filtro de Kalman [Anderson 79], los algoritmos basados en comportamientos [Arkin 98], la lógica borrosa [Beom 95] y las redes neuronales artificiales [Zalzala 96].

2.5 Aplicaciones de la robótica móvil en exteriores

Son cada vez más las aplicaciones en las que los robots móviles en general, y los robots de exteriores en particular, constituyen una herramienta esencial en su desempeño [Thorpe 95]. Se pasa así de los prototipos robóticos para investigación desarrollados en los laboratorios al diseño de robots móviles orientados a aplicaciones concretas. Debe existir, por tanto, un diálogo permanente entre la industria y los investigadores que permita conocer qué es lo que la sociedad demanda y enfocar los desarrollos hacia esa vertiente [Trevelyan 97].

El principal impulsor de esta nueva concepción de la robótica móvil aplicada lo constituye el grupo NREC (*National Robotics Engineering Consortium*). NREC, entidad dedicada al desarrollo de productos que incorporan tecnologías avanzadas de robótica, es una cooperativa integrada por investigadores de la NASA de la ciudad de Pittsburg (Pensilvania, Estados Unidos) y la Universidad de Carnegie Mellon. Diversas compañías industriales solicitan la colaboración del grupo NREC con el objetivo de emplear robots móviles para la mejora de la productividad, seguridad y minimización de costes en el desempeño de las tareas de interés para estas empresas. Se desprende, por tanto, el marcado carácter de aplicación que persigue el grupo. Actualmente, NREC desarrolla robots móviles para su aplicación en minería, agricultura, excavación y transporte pesado, lo que se traduce en la empresa en un aumento de la productividad, la seguridad y el abaratamiento de costes. Sin embargo, muchos de los robots móviles de exteriores empleados actualmente en tales tareas no son autónomos, o bien están dotados de una autonomía limitada.

Robots de intervención

El accidente nuclear de Three Mile Island (28 de Marzo de 1979), y más recientemente el de Chernobyl (26 de Abril de 1986), tristemente conocido como el peor accidente nuclear de la historia, provocaron una enorme nube radioactiva que ponía en peligro la vida de millones de personas.

Para evitar la expansión del alto nivel de radioactividad tras el accidente, se construyó un sarcófago de hierro y cemento que envolvía completamente las ruinas de la planta de Chernobyl. A pesar de los más de catorce años transcurridos desde la catástrofe, los niveles de radioactividad dentro del sarcófago son tan elevados que ninguna persona podría permanecer ni tan siquiera escasos segundos en su interior. La mayor preocupación se centra ahora en analizar el estado en que se encuentra el muro ante la posibilidad de pequeños escapes de altos niveles de radioactividad con el grave peligro que esto supone, o que filtraciones de lluvia a través de pequeñas fisuras del muro arrastren material radiactivo a aguas subterráneas. Se hace necesario monitorizar de algún modo lo que está ocurriendo en el interior del sarcófago.

Para ello, expertos en robótica de *RedZone Robotics*, Departamento de Energía de los Estados Unidos, Universidad de Carnegie Mellon, NASA y Universidad de Iowa se encuentran actualmente trabajando en la construcción del robot móvil teleoperado PIONER. Este robot es capaz de perforar paredes y suelos y extraer muestras del muro de forma que los científicos puedan estudiar su estado de conservación. También permite medir niveles de radiación, temperatura y humedad y ofrecer un mapa tridimensional del interior del sarcófago.

Fuera del contexto nuclear, existen en la actualidad proyectos internacionales en el que se de-

sarrollan tecnologías para robots móviles de emergencia ante accidentes en plantas industriales, accidentes de transporte, lucha contra el fuego, desactivación de explosivos y tareas de vigilancia [Schönberg 94]. En definitiva, se persigue la sustitución de personas por robots en aquellos trabajos que pongan en peligro la vida del hombre.

Eliminación de residuos

La tarea de eliminación de residuos se encuentra en íntima relación con la expuesta anteriormente. En ella, además de la motivación de seguridad para el hombre, la aplicación de la robótica tiene claras connotaciones económicas.

La humanidad está generando enormes cantidades de residuos que pueden llegar a constituir una amenaza para su propia supervivencia. La eliminación de estos residuos es un problema de primera magnitud en el que deberán invertirse importantes recursos. Se incluyen aquí no sólo los residuos radioactivos y químicos industriales, sino también los residuos militares originados por la carrera armamentista entre los que se encuentran, por citar un ejemplo, las minas antipersonales. Sólo en Estados Unidos se estima un gasto de quinientos mil millones de dólares en las próximas décadas, sin incluir complejos de armas estratégicas y otros residuos de instalaciones militares [Whittaker 89].

En el caso de residuos químicos o radioactivos, los robots, dotados de la suficiente movilidad, pueden reducir de forma significativa el coste necesario explorando el entorno, recogiendo datos y realizando tareas de manipulación y transporte de material. Estos datos recogidos son almacenados para realizar, ya en laboratorios, estudios ambientales.

Los campos minados constituyen un grave problema. Sólo en 1993 se colocaron dos millones y medio de minas, la mayoría de ellas en la Europa del este (casi todas en Bosnia) y en el suroeste asiático. Eliminar estas minas enterradas constituye una labor de alto riesgo y alto coste, lo que motiva y justifica el empleo de robots móviles. En este sentido se orienta el trabajo que conjuntamente realiza el Instituto de Robótica de la Universidad de Carnegie Mellon con el profesor Howie Choset a la cabeza, en colaboración con el *Robot Sensor Based Planning Lab* [Nagatani 98].

Para localizar y desactivar las minas, el robot debe pasar un detector por todos los puntos de la región que se pretende limpiar. Para ello, el robot tiene que trazar un camino cuidadosamente planificado. Los planificadores de caminos tradicionales resultan inadecuados para esta tarea, pues sólo producen vías posibles entre dos puntos dados sin prestar atención al área de intervención. Pero en esta aplicación lo que se pretende no es llegar a un punto determinado, sino que el detector de minas a bordo del robot barra toda la región objetivo. Por tanto, el desempeño

de esta aplicación obliga al estudio de planificadores de caminos.

El empleo de planificadores probabilísticos puede optimizar el barrido que debe realizar el robot. Así, en muchas situaciones pueden existir restricciones temporales que impidan un barrido total de la zona. Sin embargo, si el planificador tiene acceso a mapas probabilísticos de la localización de las minas, el robot puede primero inspeccionar celdas² con una alta probabilidad de contener minas y cuando haya transcurrido un cierto tiempo sin encontrar ninguna marchar a otra celda.

Minería

El trabajo en una mina se caracteriza por las duras y hostiles condiciones de trabajo que presenta para el hombre: visibilidad limitada, suciedad, gases, alto riesgo de accidentes, enfermedades pulmonares y oculares, etc. Estas circunstancias han motivado el empleo de robots móviles en el sector minero. Se trata de llevar a cabo de forma segura y productiva operaciones tanto en minas subterráneas como tareas en su superficie. Entre estas operaciones pueden señalarse la colocación de soportes de techos de galerías, la excavación o el acarreo de material, tareas que en su mayoría requieren desarrollar una considerable potencia.

Son dos los grupos de investigación principales que actualmente dedican sus esfuerzos al desarrollo de robots para la minería: el grupo de H. Durrant-Whyte de la Universidad de Sydney (Australia) y el grupo de A. Stentz de la Universidad de Carnegie Mellon (Pittsburg, Estados Unidos). Ambos grupos trabajan tanto en robots que realizan su tarea en el interior de la mina como en robots excavadoras que trabajan en la superficie.

Respecto a los robots que realizan su actividad en el interior de la mina, el grupo de Stentz desarrolla desde 1992 prototipos robotizados dedicados a tal fin [Shaffer 92], trabajo que aún continua bajo el proyecto *Technologies for Automating Continuous Mining Operations for Entry Development* (figura 2.1). El grupo de Durrant-Whyte se dedica especialmente al estudio del posicionamiento del vehículo [Madhavan 99] [Scheding 99]

En los robots destinados a la realización de movimientos de tierra y excavaciones, se integran buena parte de las capacidades necesarias en los robots de exteriores: movilidad en terrenos difíciles, capacidad de percepción, interacción con el entorno, etc. Se requiere, además, desarrollar potencias importantes e involucrar el modelado del entorno y la planificación de tareas.

Las excavadoras se emplean para el rápido movimiento de tierra, minerales y rocas no sólo en minas y canteras, sino también en la construcción de edificios o carreteras. La automatización

²En mapas probabilísticos, el espacio de trabajo se divide en celdas a las que se les asocia una determinada probabilidad. Así, en el caso de un campo de minas, una celda con probabilidad cercana a uno indica que es bastante probable encontrar una mina en la región de trabajo que ésta ocupa.



Figura 2.1: Prototipo actual del robot desarrollado por el grupo de Stentz para el trabajo en el interior de minas



Figura 2.2: Proyecto ALS desarrollado por el grupo de Stentz

de esta tarea responde al deseo de mejorar la productividad, minimizando el tiempo entre carga y carga y aumentar la seguridad, pues la tarea de parar la máquina en caso de encontrar alguna persona en el trayecto de la carga recae en el sistema sensorial y no en el operario. Son muchos los trabajos realizados al respecto [Singh 97], destacando sin duda el proyecto ALS (*Autonomous Loading System*) llevado a cabo por el grupo de Stentz [Stentz 98] que ha desarrollado una máquina actualmente en uso para tareas de excavación y carga automática de material (figura 2.2).

Construcción

El papel de la robótica móvil en el sector de la construcción reside en liberar al hombre de trabajos duros e incluso peligrosos que con frecuencia causan serios accidentes laborales. Algunos de los robots empleados en este campo deben protegerse para trabajar bajo condiciones climáticas y ambientales adversas: polvo, suciedad, gases, etc.

Entre las operaciones robotizadas en los últimos años o para las que existen actualmente proyectos de automatización se encuentran el manejo de grúas, construcción de muros, pavimentación y transporte de material de obras [Stentz 98] [Guillo 99].

En nuestro país, dentro del sector de la construcción, cabe citar el robot hexápodo del proyecto PACE PR12, desarrollado en el IAI-CSIC en colaboración con Astilleros Españoles. La finalidad del proyecto es la automatización de las tareas de soldadura a tope en posición para la construcción naval en el montaje de dique/grada. Para poder realizar soldaduras de buques de gran longitud tanto en vertical como en cornisa se diseñó y construyó un robot escalador de

seis patas equipado con un manipulador de soldadura [Grieco 98]. Las bases de las patas del robot están provistos de un sistema de agarre a las paredes del buque basado en electroimanes, que proporcionan gran adherencia y seguridad. Además, su control es bastante complejo, pues no sólo debe controlar los 18 grados de libertad que permiten al robot escalar, sino también supervisar la correcta realización de la tarea de soldadura.

Aplicaciones submarinas

El conocimiento y explotación de los fondos submarinos constituye otro reto importante. El número de posibles aplicaciones es muy elevado, incluyendo desde el tendido y reparación de cables y canalizaciones hasta el desarrollo de exploraciones y búsquedas en el fondo de mares y océanos.

La exploración submarina mediante robots es un hecho. El descubrimiento del *Titanic* y la recuperación de riquezas arqueológicas bajo el mar son algunos de los primeros resultados.

Los robots submarinos poseen una dinámica altamente no lineal y variante en el tiempo. Además, se encuentra sujeta a incertidumbres hidrodinámicas y perturbaciones externas tales como corrientes marinas. Todo ello requiere importantes esfuerzos relativos al estudio del comportamiento dinámico de robots en tales entornos.

En la literatura pueden encontrarse varias referencias de controladores avanzados para robots submarinos. Entre otros, se encuentran el *sliding control* [Cunha 95] [Healey 93] [Yoerger 91] [Cristi 90] [Dougherty 90], control basado en redes neuronales [Ishii 94], control borroso [DeBietto 94] o control adaptativo [Tabaii 94] [Yuh 99]. Como bases experimentales cabe destacar el robot submarino ODIN [Kawaguchi 96], desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Autónomos de la Universidad de Hawaii en colaboración con la Universidad de Purdue, y el prototipo JASON [Whitcomb 99] de la Universidad de Hopkins (Baltimore, Estados Unidos).

Aplicaciones en el mundo de la discapacidad

En los últimos años está tomando cada vez más importancia una línea de trabajo que persigue acercar las ventajas que ofrecen los robots móviles a personas discapacitadas. Las ayudas técnicas que aporta la Robótica Móvil vienen fundamentalmente de la mano del concepto de autonomía y pretenden servir como instrumento para la sustitución, o en su caso, potenciación de factores que las personas con algún tipo de discapacidad no tengan completamente desarrollados.

Los dos aspectos que se aluden con mayor frecuencia en los objetivos de los proyectos de investigación en esta vertiente están relacionados con discapacidades visuales y motóricas. Las ayudas

técnicas para el primer tipo son las comúnmente denominadas *lazarillos electrónicos*. Se trata de dispositivos móviles que ayudan a la persona a desenvolverse en su entorno de forma que le permita superar los inconvenientes relativos a sus deficiencias visuales y que pueden servir de guía para desplazamientos [Tachi 85] [Rimolo 00] [Rodríguez 00].

El segundo bloque de ayudas técnicas tiene el objetivo de cubrir las deficiencias para el movimiento en discapacitados motóricos. Los dispositivos de ayuda en este contexto son sillas de ruedas motorizadas que incluyen sistemas inteligentes que facilitan su control. Aunque las sillas de ruedas automatizadas pueden considerarse como híbridos de robots móviles de interiores y exteriores, se ofrecerá una pequeña revisión de los principales prototipos y logros alcanzados al respecto. Para dar una idea de la importancia que tiene en la actualidad este mercado puede indicarse, por ejemplo, que desde el marco de la Unión Europea se han creado estándares específicos para la interconexión de módulos de entrada de datos y de actuación sobre el entorno de sillas de ruedas [M3S 97].

El primer prototipo de silla de ruedas inteligente para discapacitados motóricos se desarrolló en la Universidad de Arizona en 1985 [Madarasz 86]. Cinco años más tarde, Connel y Viola [Connel 90] proponen un interesante modelo de control de una silla de ruedas donde aparece el concepto de cooperación entre el usuario y el sistema para el gobierno del movimiento de la silla. Así el usuario, mediante el accionamiento de diversos interruptores, solicita al sistema ayuda para llevar a cabo ciertas operaciones; sin esta solicitud es el usuario el que controla el manejo de la silla mediante una palanca de mandos.

En España, el grupo de *Asistencia a la movilidad* del Dpto. de Electrónica de la Universidad de Alcalá (Madrid), dirigido por el Dr. Mazo, posee una larga experiencia en la concepción y desarrollo de sillas de ruedas autónomas. Sus primeros prototipos datan del año 1995 [Mazo 95a] [Mazo 95b], donde se experimentaron preferentemente aspectos relacionados con la arquitectura básica del sistema, estructura sensorial y enlaces hombre-máquina. Entre los años 1997 y 1999 y bajo el proyecto SIAMO (*Sistema Integral de Ayuda a la Movilidad*) se profundizó en los dos últimos aspectos mencionados, así como en el posicionamiento absoluto de la silla para la navegación autónoma. Se creó un módulo interfaz usuario-máquina que permite el manejo de la silla de cinco formas diferentes: mediante una palanca de mandos o *joystick*, a través de la expulsión de aire, mediante la voz, con el movimiento de los ojos y con el movimiento de cabeza y ojos; se dotó a la silla de sensores de ultrasonidos para detectar obstáculos e irregularidades en el suelo, de un láser y de una cámara para obtener información tridimensional del entorno cercano a la silla. Esta cámara también se emplea para la detección de marcas artificiales que permiten su posicionamiento absoluto si desea una navegación de la misma sin asistencia humana [García JC 00a] [García JC 00b].

Paralelamente, el grupo del Dr. Ceres del IAI-CSIC ha desarrollado, junto a varias universidades iberoamericanas y bajo el proyecto PALMA (*Potenciación de los procesos de movilidad y orientación en personas con discapacidad mediante sensores de proximidad*) una plataforma para el desplazamiento de niños con serios problemas neuromotores [Ceres 00]. La plataforma permite una conducción asistida y personalizada a diferentes niveles, desde un nivel básico, donde el vehículo es capaz de evitar obstáculos de forma autónoma, hasta un nivel superior, donde el movimiento del vehículo es controlado totalmente por el niño.

Otros desarrollos en este sentido se realizan en la Universidad de Metz en Francia [Agostini 95] [Bourhis 96] y en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT (*Masachusetts Technology Institute*). Éste último trabajo contempla también la navegación en exteriores.

La robótica espacial

El empleo de robots en el terreno espacial se encuentra motivado principalmente por la imposibilidad del ser humano para realizar gran parte de estas tareas. Al igual que en otras áreas científicas y tecnológicas, la investigación espacial está siendo un importante motor de la robótica y en particular de los robots para entornos no estructurados, móviles, robots con múltiples brazos para tareas de ensamblado y, en general, todos los tópicos de la robótica más evolucionada desde la teleoperación avanzada hasta robots completamente autónomos.

En general, pueden distinguirse dentro de la Robótica Espacial entre tareas de operaciones orbitales y de exploración planetaria.

En la Robótica Orbital se contemplan robots fijos montados sobre satélites, transbordadores y estaciones espaciales, así como robots de vuelo libre capaces de acoplarse y manipular mientras se mantienen en órbita. Entre las posibles aplicaciones se incluyen la recuperación y el mantenimiento de satélites en órbita, realización de trabajos en estaciones espaciales y prototipos para el ensamblado de estructuras espaciales [Zimmerman 94]. En estas operaciones se contemplan la transición entre la teleoperación próxima por un astronauta, la teleoperación desde la Tierra y la completa autonomía.

En las tareas de la exploración planetaria se emplean robots móviles capaces de desplazarse por terrenos difíciles mientras realiza trabajos tales como investigar las características del suelo, recoger muestras y otros experimentos geológicos.

Las primeras investigaciones acerca de robots móviles para exploración planetaria se sitúan a mediados de la década de los 60, con los trabajos desarrollados en el JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) sobre teleoperación y navegación semi-autónoma en estos vehículos. En 1988, la



Figura 2.3: El robot SOJOURNER

NASA lanzó un programa para el desarrollo de robots para la exploración del planeta Marte. Bajo este proyecto, el JPL y la Universidad de Carnegie Mellon realizaron los primeros prototipos robóticos: los robots ROBBY [JPL 92] y AMBLER [CMU 92].

Pero fue el 4 de Julio de 1997 cuando se produjo el aterrizaje del primer robot móvil en la superficie de Marte. Se trata de un robot construido en el JPL y bautizado con el nombre de SOJOURNER (figura 2.3), de dimensiones reducidas (630 x 480 x 280 mm) provisto de 6 ruedas de accionamiento independiente y que forma parte del proyecto Mars Pathfinder de la NASA, cuya misión era testear *in situ* la capacidad del robot en aspectos tales como navegación autónoma, evitación de obstáculos, interacción con el entorno, etc., en un escenario como el planeta Marte. Los resultados obtenidos servirán de base para la construcción de futuros robots destinados a la exploración propia del planeta.

En lo referente a la autonomía, la capacidad de razonamiento de SOJOURNER se desvía de las rígidas secuencias de instrucciones listadas por el operador en tierra. SOJOURNER tiene la capacidad de reaccionar ante contingencias no previstas como la evitación de obstáculos y responder ante eventos no planificados. Este grado de inteligencia del robot resulta de vital importancia, pues el envío de la acción adecuada por parte de un operador humano desde la Tierra para responder al evento sería muy lenta.

Actualmente, la Universidad de Carnegie Mellon, la NASA y el JPL aúnan sus esfuerzos en un intento de mejorar la autonomía y navegación de robots espaciales para que éstos realicen con éxito su misión exploradora.

Aplicación a la agricultura

La principal motivación del empleo de robots móviles en la agricultura reside en el deseo de aumentar la productividad en este sector y liberar al hombre de tareas cuyo desempeño pueda suponer un gran esfuerzo físico o un cierto riesgo para su salud. Así, existen ya resultados de



(a)



(b)

Figura 2.4: a) Robot POCHI, b) Robot TAMA

robots para tareas agrarias tales como la fumigación inteligente [Mandow 95] [Marchant 97a]. En muchos casos los vehículos empleados son el resultado de automatizar maquinaria agrícola tradicional, tales como cosechadoras, sembradoras automáticas o tractores [Marchant 97a] [Pozo-Ruz 01a].

Son muchas las investigaciones realizadas para dotar a los vehículos agrícolas (o de forma general robots que realizan su actividad en un entorno natural) de la suficiente autonomía para la realización de estas tareas. Los primeros estudios se realizaron sobre prototipos robóticos que no iban destinados a una tarea concreta; se trataban más bien de plataformas experimentales para la prueba de los algoritmos desarrollados por los investigadores. Tal es el caso del proyecto llevado a cabo entre 1995 y 1996 por la *Modulaire Ltd.*, el Centro de Investigaciones Tecnológicas de Finlandia, la Universidad Tecnológica de Helsinki y *Roboveh Ltd.* [Rintanen 96], donde se desarrolló un sistema de navegación autónoma para un prototipo robot de exteriores realizado bajo el proyecto PANORAMA ESPIRIT II (1988-1993). Este sistema de navegación contaba con sensores de última generación, tales como GPS con rastreo de la portadora, para el conocimiento preciso de la posición del vehículo en un terreno difícil como es el campo.

El sistema de posicionamiento desarrollado en Finlandia se emplea en Japón en dos robots agrícolas resultantes de automatizar tractores convencionales: el robot POCHI, (figura 2.4a) y el robot TAMA, (figura 2.4b). A través de una cámara de vídeo montada en la parte superior delantera del robot, se podía distinguir las malas hierbas dentro del cultivo, y fumigarlas de forma selectiva.

Otro robot para la fumigación selectiva en una gran superficie de cultivo (en este caso un campo de coliflores) se desarrolló en el *Silsoe Research Institute* (Reino Unido). En este caso, la plataforma robótica no era un tractor convencional, sino un vehículo construido especialmente para tal fin, por lo que presenta una gran robustez y estabilidad mecánica. Respecto a los

sensores, el robot disponía de una cámara monocromática y de un odómetro en cada una de las ruedas delanteras, por lo que su sistema de navegación posee connotaciones distintas a los modelos anteriores.

Para el posicionamiento y guiado del vehículo se aprovechó la estructura del cultivo, donde las plantas se disponen en filas equidistantes. Mientras avanza el robot, se identifican las filas de coliflores en la imagen captada por la cámara mediante la transformada de Hough [Brivot 96]. El controlador del vehículo fusiona la salida de la transformada de Hough, que son las filas a seguir, con los datos odométricos para obtener la mejor estimación de su posición y enviar las órdenes oportunas a los actuadores. Mediante un proceso de segmentación se diferencia en la imagen captada por la cámara entre la mala hierba y la cosecha y realizar de esa forma la fumigación.

Otros robots agrícolas han sido diseñados para llevar a cabo labores de recolección de frutos. En este sentido se sitúan los trabajos realizados por el grupo del profesor Edan para la recolección de melones [Edan 00]. El robot empleado posee como sensores dos cámaras de vídeo monocromáticas que permite la detección del fruto. Un manipulador situado sobre el robot permite su recolección.

En España se ha incrementado en los últimos años la investigación en el campo de los robots móviles hacia aplicaciones agrarias. En este sentido, es de destacar el trabajo realizado por el grupo de A. Ollero de la Universidad de Sevilla en colaboración con la Universidad de Málaga y que culminó con el diseño y construcción del robot móvil AURORA cuya finalidad era la fumigación en invernaderos [Mandow 96] (figura 2.5). Para el algoritmo de navegación, se aprovechó la estructura homogénea de un invernadero, donde las plantas se disponen en filas equidistantes. A través de un conjunto de sensores de ultrasonidos, el robot se mueve centrado entre el pasillo de plantas para realizar la tarea de fumigación. Es de indicar que en este proyecto no se prestó atención al mecanismo de fumigación en sí, esto es, la fumigación no se realizaba de forma selectiva o particularizada al estado y necesidad de cada planta. El mayor esfuerzo estaba centrado en la construcción del robot adecuado para tales entornos y en el mecanismo reactivo de navegación.

En la actualidad, el Grupo de Percepción Activa (GPA) del IAI-CSIC se encuentra inmerso en el proyecto denominado *Arquitectura multiagente: generación de comportamiento complejo para un robot de pulverización en exteriores*, cuyo fin es el desarrollo de un tractor autónomo, el robot DÉDALO (figura 2.6a), adecuadamente sensorizado para exteriores, capaz de llevar a cabo la fumigación selectiva de olivos. La dificultad de este proyecto reside no sólo en lo complejo de la tarea de fumigación, donde hay que localizar el árbol, evaluar su estado y en función del mismo dosificar el pesticida, sino en el propio terreno por donde se mueve el robot, por

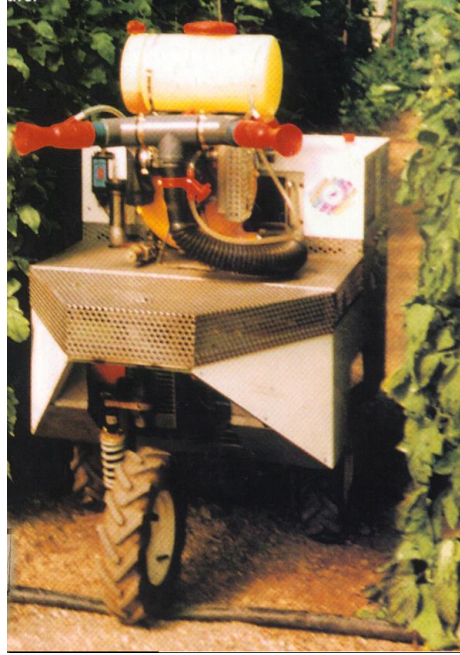


Figura 2.5: El robot AURORA

la ausencia de una estructura fija que facilite los algoritmos de localización y navegación. Esta tesis se enmarca dentro de dicho proyecto; en concreto resuelve el problema de la localización del vehículo en un entorno natural. Como banco de pruebas se ha empleado el robot ROJO (figura 2.6b), que consiste en un vehículo cortacésped comercial que ha sido totalmente automatizado y sensorizado en el IAI-CSIC. Los algoritmos de posicionamiento desarrollados para el robot ROJO son totalmente aplicables al robot DÉDALO. En el capítulo 4 se presenta una descripción detallada del robot ROJO con el que se trabajará a lo largo de esta tesis: su sistema de actuación, el sistema sensorial incorporado para la tarea de la localización y el sistema de proceso que permite el envío de órdenes por parte del usuario y la monitorización del tractor.

2.6 Recapitulación

Este capítulo ha presentado el estado actual de la robótica móvil en exteriores, haciendo especial énfasis en la problemática del posicionamiento de robots. Así, se ha realizado un recorrido por los diferentes sistemas de posicionamiento de vehículos, desde los sistemas explícitos, aquellos basados en medidas internas y en la estimación mediante balizas, hasta los estimadores basados en la percepción del entorno. Se han presentado las ventajas e inconvenientes de cada una de estas técnicas y su adecuación a los diferentes escenarios por los que se mueve el robot.

Se ha justificado la necesidad de emplear sensores complementarios y redundantes para conseguir un posicionamiento continuo, preciso y en tiempo real de vehículos en entornos naturales.



(a)



(b)

Figura 2.6: Robots de exteriores del IAI-CSIC: a) robot DÉDALO, b) robot ROJO

Finalmente, se ha realizado una revisión bibliográfica de los principales robots móviles de exteriores aplicados a tareas tediosas e incluso peligrosas para el hombre, y que ponen de manifiesto la importancia de esta nueva perspectiva de la robótica.

Capítulo 3

GPS: Sistema de posicionamiento global mediante satélites

3.1 Introducción

El sistema de posicionamiento global mediante satélites GPS constituye uno de los más importantes avances tecnológicos de las últimas décadas. El GPS es un sistema de navegación diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo [Enge 99a].

Este sistema, declarado operativo en julio de 1995, se basa en el empleo conjunto de ordenadores y de una constelación de 24 satélites que orbitan el planeta a gran altitud, para determinar, por triangulación, la longitud, latitud y altitud de cualquier objeto sobre la superficie terrestre [Herring 96] [Fernández 97]. En el ámbito civil, y alegando a razones de seguridad, hasta el 1 de mayo de 2000 sólo se permitía el uso de un subconjunto degradado de señales GPS. A partir de esta fecha, el cese de la disponibilidad selectiva mejora aproximadamente en un factor de diez la precisión en aplicaciones civiles (esto es, con un error de ± 15 m.).

Sin embargo, tanto en tiempos de la disponibilidad selectiva como en ausencia de ésta, ciertas aplicaciones civiles siguen requiriendo precisiones aún mejores de las que el sistema suministra. Esto ha llevado a la comunidad civil a la búsqueda de alternativas para obtener una excelente precisión en la localización: son las denominadas técnicas diferenciales. El grado de precisión alcanzado depende de la técnica diferencial elegida y de las prestaciones del receptor GPS, y oscila entre los cinco metros y pocos centímetros (en el 95% de los casos) en tiempo real, o incluso milímetros en caso de emplear postprocesamiento.

En este capítulo se presenta el estado del arte y principios de funcionamiento del sistema GPS. Se describen las diferentes técnicas de empleo del sistema y se ofrece un estudio experimental

de aquellas utilizadas en la localización de vehículos autónomos.

3.2 El sistema GPS

3.2.1 Antecedentes del GPS

Son varios los sistemas de posicionamiento considerados como los antecesores del GPS. En ellos, las señales de radio eran emitidas desde una pequeña red de transmisores terrestres, en lugar de satélites como hace el GPS. Ejemplos de tales sistemas son LORAN-C (*Long Range Navigation*), OMEGA, DECCA, entre otros.

El sistema OMEGA permitía asegurar una convergencia global en el cálculo de posiciones gracias a una frecuencia portadora muy baja que se propagaba alrededor del mundo desde ocho estaciones transmisoras. Sin embargo, la precisión que permitía obtener se situaba alrededor de 7 km, si bien podía mejorarse en ciertas áreas. En el Plan Federal de Radionavegación de 1994 se declaró el día 30 de septiembre como fecha de finalización del sistema OMEGA.

El LORAN-C fue desarrollado inicialmente para proporcionar a los usuarios militares un sistema de radionavegación con mayor cobertura y precisión que su antecesor el LORAN-A. Posteriormente se generalizó su empleo a usuarios civiles, como asistente para la navegación en áreas costeras. La precisión que proporciona el LORAN-C es bastante estable con el tiempo, pero varía con la localización del receptor. En términos generales, el LORAN-C proporciona precisiones absolutas del orden de los 500 m., si bien en posicionamiento relativo proporciona precisiones mucho mejores, entre 20 m. y 100 m. La FAA (*Federal Aviation Administration*) junto con la Guardia Costera de los Estados Unidos impulsaron la ampliación del sistema LORAN-C al interior del continente americano y el sur de Canadá¹. El proyecto culminó en junio de 1991. Sin embargo, la rápida expansión del sistema GPS ha restado importancia a este sistema de navegación.

El sistema DECCA es un sistema de navegación aérea y marítima con cobertura en el oeste europeo, el área de los Balcanes, el sur de África, India, Japón y Australia. La precisión de este sistema oscila entre los 20 m. y los 50 m. cuando la separación entre el receptor y las estaciones transmisoras es menor a los 220 km., si bien la precisión queda degradada a unos 500 m. para distancias mayores.

El sistema GPS no es ni mucho menos pionero en lo que a sistemas de navegación mediante satélites se refiere. El primer sistema operativo de tales características fue puesto en marcha en el año 1964 y se denominó *Navy Navigation Satellite System*, conocido como *Transit System*

¹En Europa, Japón y China se están desarrollando sistemas de similares características al LORAN-C.

o *SatNav*. Este sistema se basaba en un nuevo concepto descubierto a finales de la década de los 50: mediciones Doppler en señales radiadas por un satélite situado en una órbita conocida con exactitud pueden emplearse para el cálculo de posiciones. El sistema empleaba un total de cinco satélites situados en órbitas muy bajas (1100 km.) y prácticamente circulares. Un único satélite permitía obtener la localización del receptor en tierra. Como sólo un satélite se encontraba visible en un mismo instante, el usuario tenía que esperar un tiempo de hasta 100 minutos, tiempo entre que un satélite deja de estar visible hasta que lo está el siguiente, para obtener de nuevo su posición.

El sistema *Transit* fue empleado por la marina norteamericana para el posicionamiento de barcos y submarinos. Sin embargo, los problemas que presentaba debido al escaso número de satélites, dificultando el conseguir una fijación, y el empleo de mediciones Doppler de baja frecuencia, que ocasionaban errores significativos de posición ante pequeños movimientos en la unidad receptora, provocó su decadencia ya desde principios de 1967, declarándose definitivamente inoperativo en 1996.

Un sistema similar al GPS, denominado GLONASS (*Global Navigation Satellites System*), fue desarrollado por el gobierno de la antigua Unión Soviética. Aunque no constituye un antecesor del GPS, sino que se desarrolló en paralelo a aquél, resulta conveniente su comentario. GLONASS, al igual que el GPS, se diseñó en principio con fines militares, aunque se reservó un subconjunto de señales para su utilización en aplicaciones civiles [Herring 96]. Tras la disolución de la Unión Soviética, la responsabilidad del sistema GLONASS fue asumida por la Federación Rusa. Aunque el sistema contaba inicialmente con una constelación de 24 satélites distribuidos en tres planos orbitales inclinados 64.8° y situados a 19100 km. de altitud con un período de 11 horas 15 minutos, en la actualidad sólo 14 de ellos se encuentran operativos.

Los usuarios civiles son los más beneficiados por la puesta en funcionamiento del sistema GLONASS, debido fundamentalmente a la ausencia de degradación de la señal. Sin embargo, la incertidumbre sobre el futuro del sistema parece haber limitado la demanda, desalentando a las empresas en la fabricación de receptores GLONASS. No obstante, sí se ha impulsado la fabricación de receptores que combinan señales procedentes de satélites GPS y satélites GLONASS para el cálculo de posiciones.

3.2.2 Arquitectura del GPS

El GPS se descompone en tres segmentos básicos [Dana 95]: segmento espacio, segmento control y segmento usuario, siendo los dos primeros de responsabilidad militar.

Segmento espacio

El segmento espacio está formado por 24 satélites (21 primarios y 3 de reserva en órbita) distribuidos en seis planos orbitales inclinados 55° respecto al Ecuador, a razón de cuatro satélites en cada plano orbital (figura 3.1). Los satélites describen una órbita prácticamente circular de 26560 km. de radio y poseen un periodo de 12 horas, en comparación con el de la Tierra que se aproxima a las 24 horas (23 horas, 56 minutos). Así, al ser la velocidad de rotación de la Tierra dos veces menor que la de los satélites GPS, en un intervalo de 24 horas el satélite habrá recorrido dos veces su órbita espacial y, sin embargo, únicamente habrá completado un viaje alrededor de la superficie terrestre [Myers 95]. Todos los satélites poseen un sistema de propulsión que permite mantener la posición de su órbita y el control de estabilidad mediante órdenes de radio desde tierra [Sonnenberg 88].

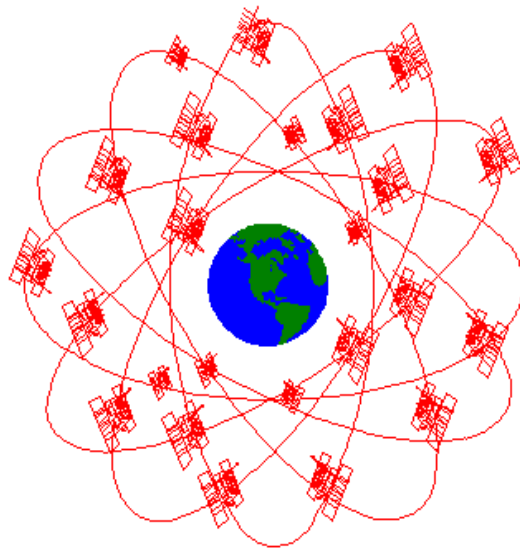


Figura 3.1: Segmento espacio [Dana 95]

Para estudiar la viabilidad del sistema GPS se desarrolló, en las décadas de los 70 y de los 80, una constelación prototipo de satélites denominados *Block I*. Once de estos satélites se lanzaron entre 1978 y 1985, pero uno de los lanzamientos resultó fallido. Los diez satélites en órbita tuvieron una vida media aproximada de nueve años. El éxito del sistema prototipo dió lugar a la autorización por parte del gobierno americano para la producción del sistema actualmente operativo. Los nuevos satélites, denominados *Block II* y *Block IIA*, incluían mejoras respecto a los satélites *Block I*. Veintiocho de estos satélites *Block II/IIA* fueron lanzados entre 1989 y 1997, de los que sólo dos han sido retirados de servicio. Una tercera generación de satélites GPS fue autorizada por el gobierno americano mientras los satélites *Block II/IIA* se encontraban aún en producción. Estos satélites, denominados *Block IIR*, poseen una vida media mayor que sus

antecesores e incorporan una función que permite operar a los satélites durante periodos largos de tiempo sin contacto con las estaciones terrestres. El primer satélite *Block IIR* se destruyó debido a un fallo en su lanzamiento, pero el segundo de ellos, lanzado también en 1997, se encuentra en perfecto estado de funcionamiento. Actualmente, la cuarta generación de satélites GPS, conocida como *Block IIF*, se encuentra en desarrollo y se prevé su lanzamiento entre los años 2000 y 2002 [Fisher 99].

Segmento control

El segmento control opera de forma ininterrumpida desde 1985, siendo responsabilidad de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos (USAF, *United States Air Force*). El segmento control consta de cinco estaciones monitoras: Hawaii, Kwajalein, Ascensión, Diego García y Colorado, que son las encargadas de mantener en órbita la constelación de satélites GPS y supervisar su correcto funcionamiento; tres antenas terrestres: Ascensión, Diego García y Kwajalein, que envían a los satélites los datos que éstos deben difundir; y una estación de control experta, situada cerca de Colorado Springs, que supervisa todas las operaciones del sistema [Vannicola 95]. La figura 3.2 muestra la situación de las distintas estaciones monitoras, así como de la estación de control maestra. En un futuro próximo, se encontrará operativa una nueva estación monitora situada en Cabo Cañaveral.

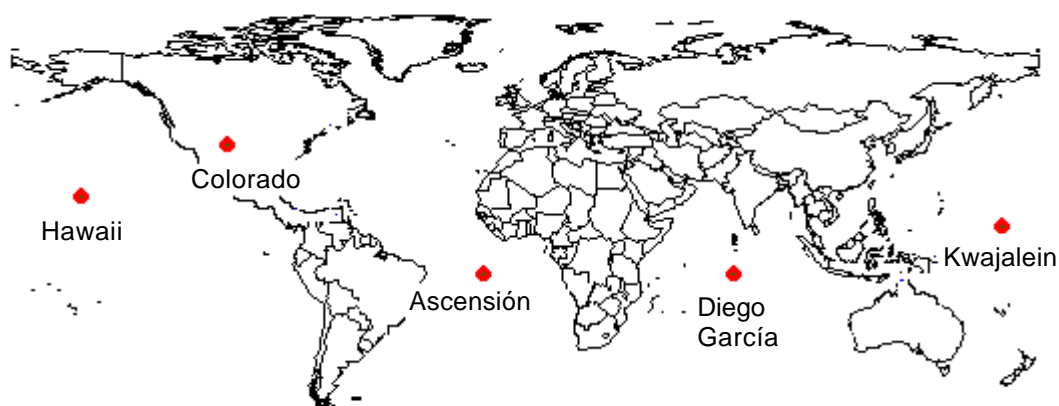


Figura 3.2: Situación de las estaciones monitoras y de la estación maestra

Actualmente se encuentra en fase de diseño un nuevo sistema de control para la estación experta que contempla hasta un total de veinte estaciones monitoras. Esta nueva red de estaciones monitoras estará formada por las seis estaciones monitoras GPS (las cinco originales y la nueva de Cabo Cañaveral) y ocho estaciones monitoras operadas por la Agencia de Defensa de Cartografía (DMA, *Defense Mapping Agency*). La expansión de la red de estaciones monitoras proporcionará

un mejor control de efemérides y de los relojes de los satélites, lo que se traduce en una mejora en la precisión para los usuarios GPS.

Segmento usuario

En este tercer nivel jerárquico se encuentran las antenas y los receptores en tierra que proporcionan a los usuarios información acerca de la posición, la velocidad y el tiempo a través del protocolo NMEA (*National Marine Electronics Association*) (apéndice A). La figura 3.3 muestra un receptor GPS y su antena.



Figura 3.3: Receptor GPS y su antena

Los primeros receptores GPS datan de mediados de los ochenta y fueron diseñados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Esta primera generación de receptores reflejaba el estado del arte de la tecnología de aquel tiempo, y se caracterizaban por su elevado peso y tamaño. Se emplearon con fines militares en el posicionamiento de aviones, barcos y tanques.

En el ámbito civil se aprovechó las investigaciones realizadas por el Departamento de Defensa en los años 70 y 80 para el desarrollo y mejora de una nueva generación de receptores. Este favor retorna ahora a las aplicaciones militares, que han incorporado en sus receptores los extraordinarios avances en el diseño y fabricación de receptores civiles en los últimos diez años. Hoy en día existen más de 70 fabricantes de receptores GPS en todo el mundo, con una oferta de más de 420 modelos diferentes [Shaw 99].

3.2.3 Principios de funcionamiento del GPS

El sistema GPS tiene por objetivo calcular la posición de un punto cualquiera en un espacio de coordenadas (x, y, z) , partiendo del cálculo de las distancias del punto a un mínimo de tres satélites cuya localización es conocida.

Supóngase que se conoce con certeza que un determinado objeto en la Tierra se encuentra a una distancia a del satélite A , es decir, está situado en algún lugar de la superficie de una esfera centrada en el satélite A y de radio a . Se sabe además que el objeto se encuentra a una distancia b de un segundo satélite B , por lo que su localización queda delimitada al círculo intersección de ambas esferas. Si, por último, se conoce que la distancia del objeto a un tercer satélite C es c , sólo existirán dos puntos donde las esferas de radios a , b y c intersecten. Es decir, el conocimiento de las distancias a tres satélites reduce a dos los puntos donde el objeto puede encontrarse. Uno de los puntos resulta ser una solución no válida al encontrarse muy lejos de la Tierra, con lo que, en principio, tres mediciones serán suficientes para conocer la localización exacta del objeto en la Tierra.

Dado que el funcionamiento del GPS se basa en el conocimiento de la distancia del receptor GPS a los satélites en el espacio, se requiere un método que permita calcular el valor de dicha distancia. La técnica empleada por el receptor GPS consiste en medir el tiempo que tarda en llegar una señal de radio emitida desde un satélite y calcular la distancia multiplicando dicho tiempo por la velocidad de propagación de la señal de radio. Esto es lo que se conoce como *seguimiento o medida de código*².

Para medir el tiempo que tarda la señal de radio desde que es emitida por el satélite hasta su llegada al receptor es necesario que los relojes de los satélites y de los receptores estén sincronizados, pues deben generar simultáneamente el mismo código pseudoaleatorio.

Así, el tiempo de propagación de la señal se mide comparando el retardo de la secuencia generada en el receptor GPS con la emitida por el satélite, esto es, se realiza la correlación entre ambas secuencias (figura 3.4). El instante de recepción se mide utilizando el reloj del receptor, mientras que el instante de emisión está incluido en el mensaje de navegación y lo proporciona los relojes a bordo del satélite.

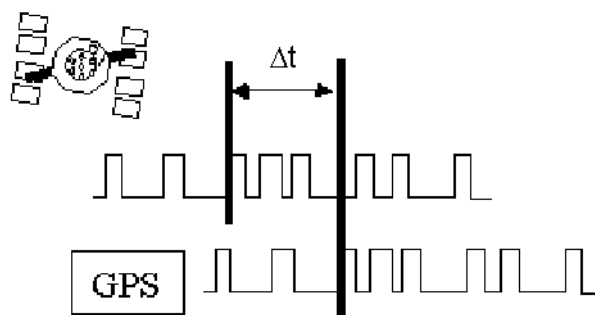


Figura 3.4: Medida de la distancia a los satélites [Enge 99a]

²Existe también la denominada *seguimiento o medida de fase* de la portadora. Una descripción de su funcionamiento se presenta en la sección 3.2.7.

Los satélites llevan a bordo cuatro relojes atómicos³, dos de cesio y dos de rubidio, que funcionan con energía eléctrica. Ésta es la referencia de tiempo más estable y precisa que se conoce. Sin embargo, el reloj del receptor GPS es un oscilador de cuarzo de bajo coste y, por lo tanto, impreciso. La inevitable diferencia entre las dos bases de tiempos hace que las distancias calculadas no sean del todo exactas, por lo que se denominan *pseudodistancias*⁴. Esta desviación en el reloj del receptor añade una incógnita más, lo que hace necesario un mínimo de cuatro satélites para estimar correctamente las posiciones (figura 3.5). La figura 3.6 muestra con línea punteada las *pseudodistancias* y con trazo continuo la media corregida tras el cálculo del error de sincronismo del reloj del receptor.

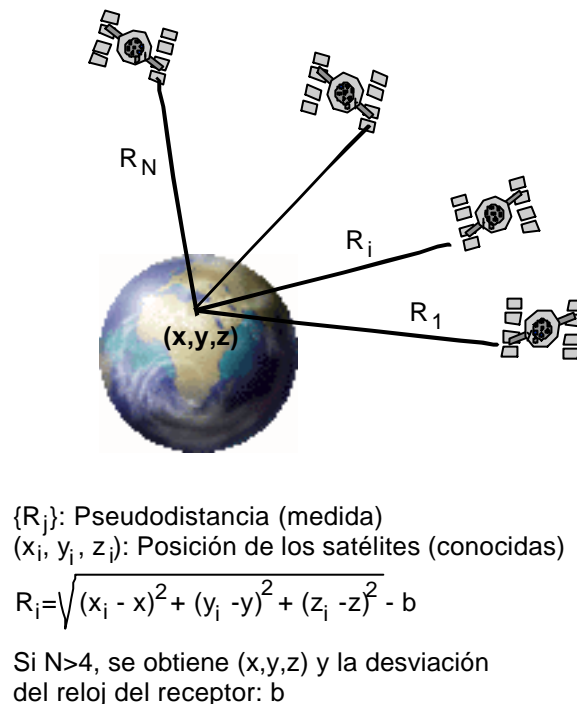


Figura 3.5: Principio de funcionamiento del GPS [Enge 99a]

La utilización de estos códigos pseudoaleatorios permite, por un lado, el control del acceso al sistema de satélites al Departamento de Defensa de los Estados Unidos, de forma que en situaciones conflictivas pueda cambiar el código, o incluso en tiempo de paz dotar de cierta exclusividad al sistema. Por otro lado, hace posible que todos los satélites que integran el sistema empleen la misma banda de frecuencia sin interferirse unos a otros [Braasch 99].

Un receptor GPS destina un canal para cada uno de los satélites empleados en los cálculos de forma exclusiva. Cada canal está formado por dos bloques fundamentales: el lazo de seguimiento

³Los relojes atómicos deben su nombre a que emplean como metrónomo las oscilaciones de un átomo en particular.

⁴Un preciso sincronismo es la clave para la medición de la distancia. A modo de ejemplo, si el desincronismo entre los relojes de un satélite y del receptor GPS fuese tan solo de una centésima de segundo, como las señales de radio viajan a 300000 km/s, la distancia calculada tendría un error de 3000 km.

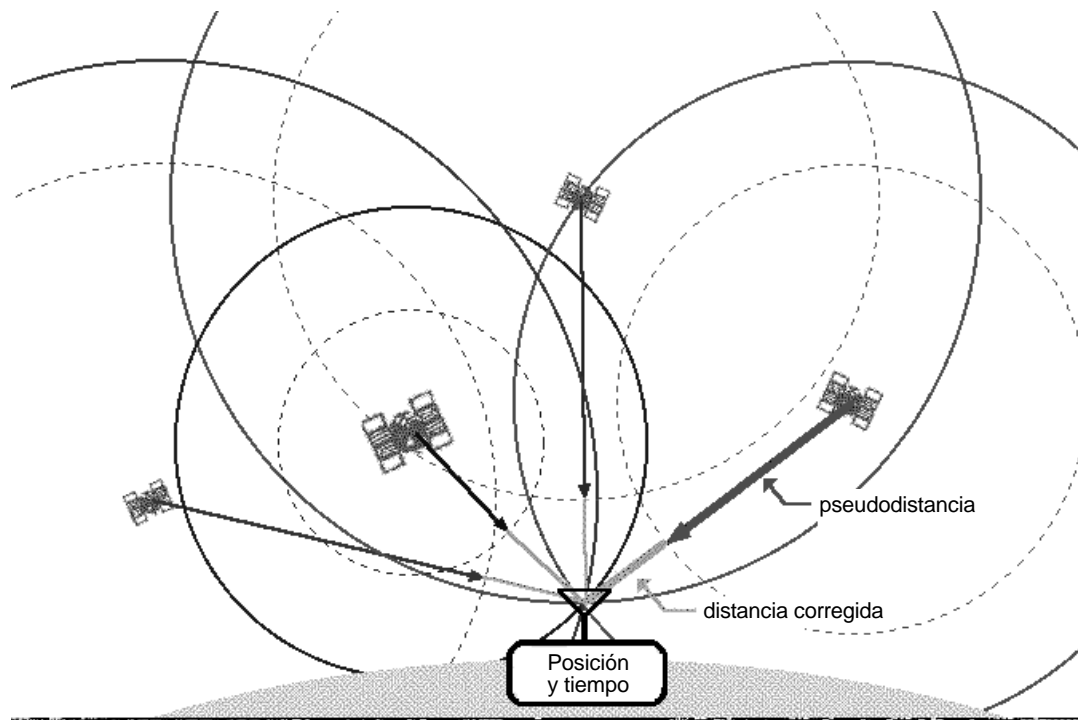


Figura 3.6: Corrección del error de sincronismo [Dana 95]

de código y el lazo de seguimiento de fase. El lazo de código es el encargado de sincronizar la secuencia recibida con una generada localmente, esto es, la medida del desfase de tiempo entre la emisión de la señal y la recepción de la misma y que se emplea en el cálculo de la *pseudodistancia*. El lazo de fase sincroniza la portadora recibida con la generada localmente, lo que permite realizar medidas de fase y demodular la señal BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

La salida de cada canal es empleada por el procesador de navegación, cuya función principal es la de resolver la ecuación de navegación, esto es, la obtención de la posición del receptor. Otras funciones del procesador de navegación son: representar al usuario la información de manera útil, aplicar las correcciones diferenciales (sección 3.2.7), integrar el GPS con otros sistemas de navegación, etc. La figura 3.7 muestra un esquema simplificado de un receptor GPS.

Aunque la velocidad de los satélites es elevada (4 km/s), la posición instantánea de los mismos puede estimarse con un error inferior a varios metros en base a una predicción sobre las posiciones anteriores en un periodo de 24 a 48 horas. Las estaciones terrestres revisan de forma periódica los relojes atómicos de los satélites, enviando las efemérides⁵ y las correcciones de los relojes, pues la precisión de los relojes y la estabilidad de la trayectoria de los satélites son claves en el funcionamiento del sistema GPS.

⁵Las efemérides son las predicciones de la posición actual de los satélites que se transmiten al usuario en el mensaje de datos.

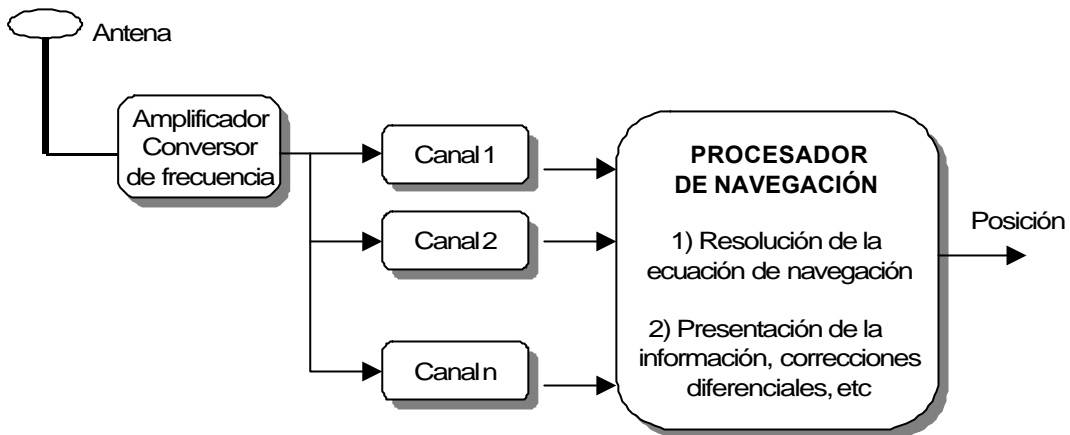


Figura 3.7: Esquema simplificado de un receptor GPS

3.2.4 Cadenas de código y niveles de servicio GPS

Gran parte del potencial del sistema GPS se debe al tipo de señal que utiliza [Kaplan 96]. El sistema GPS utiliza la modulación de espectro ensanchado DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) [Braasch 99]. Esta modulación es muy resistente a interferencias, permite tener confidencialidad en la comunicación, realizar medidas precisas de distancias y utilizar una técnica de acceso múltiple por división en código (CDMA, *Code Division Multiple Access*)⁶ [Fernández 97].

La figura 3.8 representa un diagrama funcional de la generación de la señal GPS. Todas las componentes de la señal se derivan del oscilador que incorporan los satélites y que genera una frecuencia fundamental v_f de 10.23 MHz (tabla 3.1). Así, a partir de esta frecuencia fundamental, se generan dos portadoras en la banda L de radiofrecuencia, denominadas L1 y L2. La frecuencia portadora L1 corresponde a 1575.42 MHz y la frecuencia portadora L2 a 1227.60 MHz. Se utilizan dos tipos de secuencias *pseudoaleatorias* (PRN, *Pseudorange Noise*), la secuencia C/A (*Coarse/Adquisition*) y la secuencia P (*Precision*). La portadora L1 está modulada en cuadratura por los dos códigos C/A y P, mientras que la portadora L2 sólo está modulada por el código P [Enge 99a].

Componente	Frecuencia (MHz)
Frecuencia fundamental	$v_f = 10.23$
Portadora L1	$154v_f = 1575.42$
Portadora L2	$120v_f = 1227.60$
Código P	$v_f = 10.23$
Código C/A	$v_f/10 = 1.023$
Mensaje de navegación	$v_f/204600 = 50 \cdot 10^{-6}$

Tabla 3.1: Componentes de la señal y su frecuencia

⁶La diferencia fundamental entre el sistema GPS y el sistema GLONASS en cuanto a la estructura de la señal se refiere, es la técnica de acceso al sistema, que en el GLONASS es mediante acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*).

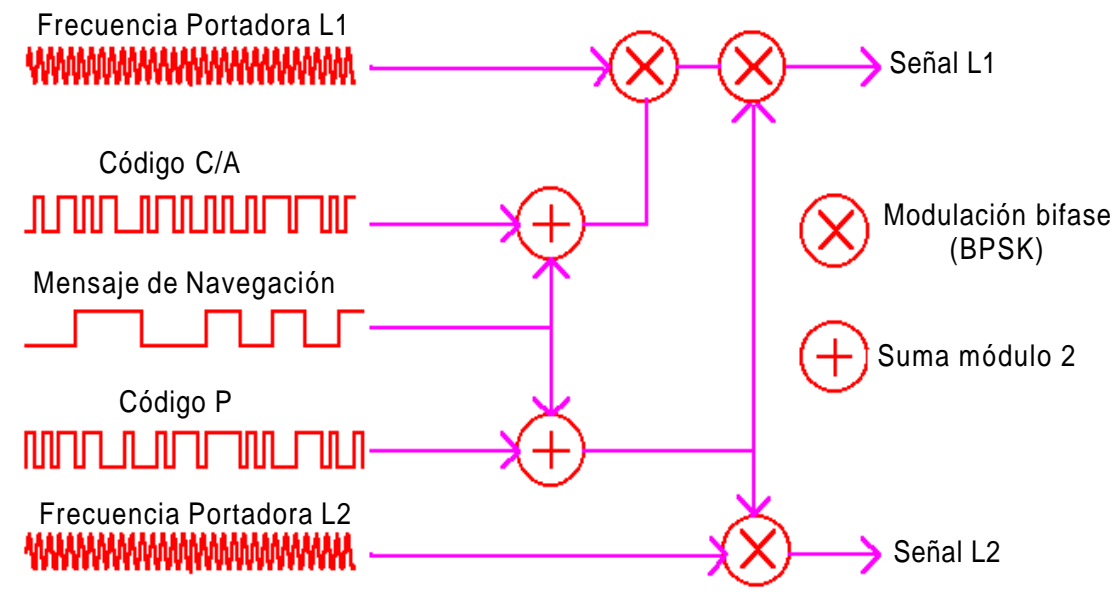


Figura 3.8: Señales transmitidas por los satélites [Dana 95]

El código C/A es el empleado en los receptores civiles y se repite cada milisegundo. El código P, secreto y de uso exclusivo militar, tiene una velocidad diez veces mayor que la del código C/A. La secuencia del código P tiene un periodo de repetición de 266 días y se divide en fracciones de 7 días [Enge 99a]. Con el fin de proteger el código P, éste se encripta usando un código W, dando lugar al código Y. Este código sólo es conocido por el Ejército de los Estados Unidos y por los países aliados. Si el código W está activo significa que se encuentra conectado el modo de operación AS (*Anti Spoofing*) o antiengaños. Este modo de operación, operativo desde 1994, impide la generación y transmisión de una señal igual a la de los satélites GPS [Fernández 97].

Se distinguen así tres tipos de señales GPS: Código C/A en L1 y código P(Y) en L1 y en L2. Cada una de estas señales consta de tres elementos [Enge 99a]: una portadora (L1 o L2), un único código pseudoaleatorio de espectro ensanchado (C/A o P(Y)) y un conjunto de datos codificados en binario denominado mensaje de navegación.

El mensaje de navegación, enviado por los satélites a 50 bit/s, contiene información sobre el reloj de los satélites, parámetros orbitales (efemérides), estado de funcionamiento de los satélites y otros datos de corrección. El mensaje consta de 25 grupos. Cada grupo contiene 1500 bits, divididos en 5 celdas de 300 bits cada una. La primera de las cinco celdas de cada grupo ofrece correcciones para el reloj del satélite. Las celdas segunda y tercera contiene información sobre las predicciones de las órbitas de los satélites, esto es, datos de efemérides. Por último, las celdas cuarta y quinta están destinadas a la transmisión de otros datos de interés tales como desvío del reloj del satélite respecto del UTC (*Universal Time Coordinates*), modelos de la atmósfera, etc. Cada celda tarda 6 segundos en transmitirse, por lo que cada grupo tardará 30 segundos y

el mensaje de navegación completo un total de 12 minutos y 30 segundos. La figura 3.9 muestra la estructura de uno de los 25 grupos de que consta la señal de navegación.

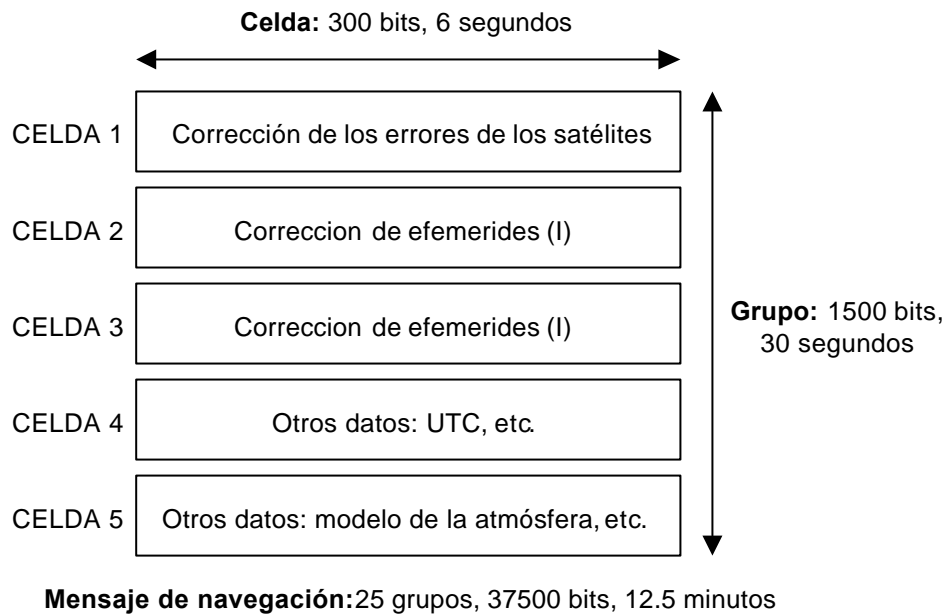


Figura 3.9: Estructura del mensaje de navegación

El mensaje de navegación se suma módulo 2 a las secuencias pseudoaleatorias (C/A y P) y el resultado se modula en BPSK a las dos portadoras L1 y L2, tal como muestra la figura 3.8.

El GPS proporciona dos niveles diferentes de servicio que separan el uso civil y militar del sistema: Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS, *Standar Positioning Service*) y el Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS, *Precise Positioning Service*) [Enge 99a].

El SPS es un servicio de posicionamiento en espacio y tiempo proporcionado por la portadora L1 del GPS. Dicho servicio contiene el código C/A y los mensajes de navegación. Aunque la portadora L1 contiene también el código P, éste no forma parte del SPS. El PPS, por el contrario, es un servicio de alta precisión de posicionamiento en espacio, velocidad y tiempo, únicamente accesible a los usuarios autorizados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Transmiten datos en código P en las portadoras L1 y L2 del GPS para corregir los errores ionosféricos (figura 3.10).

3.2.5 Fuentes de error en los GPS

Son varias las fuentes de error que en la actualidad afectan de forma significativa a las medidas realizadas por los GPS [Pozo-Ruz 00a]. A continuación se describen cada una de ellas.

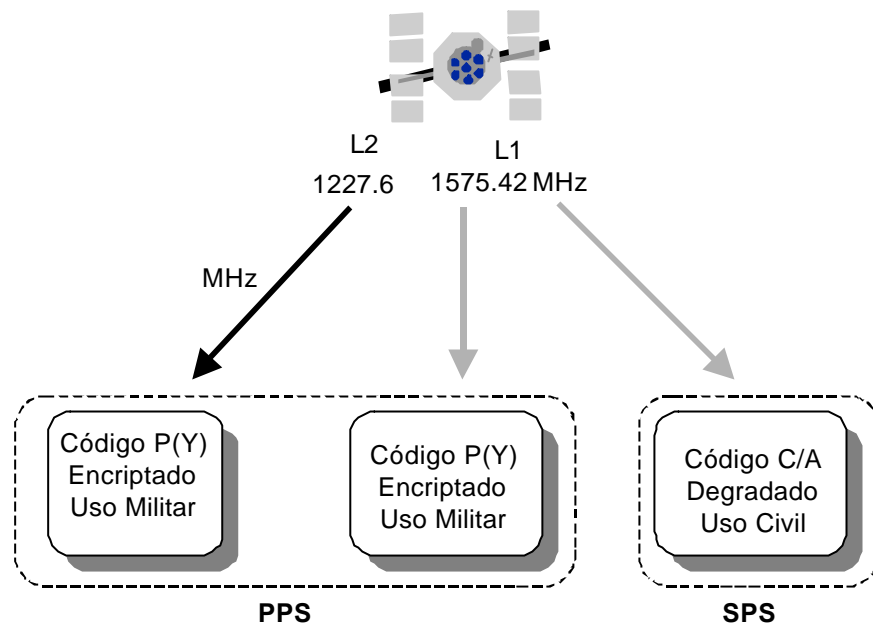


Figura 3.10: Niveles de servicio del GPS [Enge 99a]

- **Perturbación ionosférica.** Uno de los errores que más afecta a las señales de radio empleadas por los GPS se origina cuando la señal GPS transmitida desde el satélite atraviesa la ionosfera y la troposfera terrestre. Los parámetros del medio modifican la velocidad de las señales de radio cuando la atraviesan. Este cambio en la velocidad se traduce en un retraso en la llegada de la señal de radio al receptor GPS y, por tanto, el cálculo de la distancia satélite-receptor resulta erróneo, ya que en dichos cálculos se presuponen una velocidad constante de la luz.

Para solucionar este problema, se puede predecir cuál será la variación típica de la velocidad en un día medio, para unas condiciones ionosféricas medias, y aplicar ese factor de corrección a todas las mediciones. Esta solución es la adoptada por la mayoría de los receptores. Otra forma consiste en examinar las velocidades relativas de dos señales diferentes. Como la deceleración de la luz en la ionosfera es inversamente proporcional al cuadrado de su frecuencia, con dos señales GPS distintas a frecuencias diferentes se puede deducir el tipo de deceleración que ha sufrido. Esto es lo que se denomina *solución libre de influencia ionosférica* y sólo lo incorporan receptores avanzados de frecuencia dual.

- **Errores atmosféricos.** Tras atravesar la ionosfera, las señales GPS atraviesan la atmósfera terrestre. El vapor de agua que existe en la atmósfera afecta a las señales electromagnéticas, disminuyendo la velocidad de las mismas y aumenta el tiempo de llegada al receptor GPS, que calculará una posición errónea. Los errores generados son similares en magnitud a los causados por la ionosfera, pero su corrección es prácticamente imposible.

- **Imprecisión en los relojes de los satélites.** Los relojes atómicos de los satélites presentan pequeñas variaciones a pesar de su cuidadoso ajuste y control.
- **Errores en el receptor.** Los relojes de los receptores, menos precisos que los de los satélites, también cometen errores. Así, pueden provocar un redondeo inadecuado en el cálculo de una órbita o una interferencia eléctrica puede ocasionar correlaciones erróneas de los códigos pseudoaleatorios. Si el error es grande resulta fácil detectarlo, pero no sucede lo mismo cuando las desviaciones en los cálculos son pequeñas.
- **Errores de efemérides.** Las efemérides son las predicciones de la posición actual de los satélites. Un error en esta predicción causa un cálculo erróneo de la posición.
- **Interferencia "Disponibilidad Selectiva, S/A".** La precisión de los GPS puede ser degradada de forma intencionada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos utilizando un modelo operativo denominado Disponibilidad Selectiva (S/A). Su finalidad es la de denegar la ventaja táctica de posicionamiento GPS, introduciendo errores en los relojes de los satélites y en el código enviado [Sonnenberg 88]. Para el usuario, la S/A aparece como un cambio continuo en la posición del receptor. Hasta el momento en que se decretó su cese (1 de mayo de 2000), constituía la mayor fuente de error de las señales de radio.
- **Error multisenda.** Las señales transmitidas por los satélites pueden sufrir reflexiones antes de alcanzar el receptor. Este error no puede atribuirse ni a los satélites ni a los receptores GPS. Resulta muy difícil modelar los errores multisenda, ya que dependen del entorno donde se ubica la antena del GPS. Los receptores modernos emplean técnicas avanzadas para el procesamiento de la señal y antenas especiales para minimizar este problema, pero aún así pueden añadir alguna incertidumbre a la medición.

La tabla 3.2 resume las principales fuentes de error y su orden de magnitud. No se cuantifica el error multisenda pues depende de la ubicación de la antena del receptor.

Fuente de error	Magnitud
Errores ionosféricos/atmosféricos	3.6 m
Errores del reloj de los satélites	0.6 m
Errores del receptor	1.2 m
Errores de efemérides	0.6 m
Errores de S/A en su peor caso	30 m

Tabla 3.2: Recopilación de errores [Dana 95]

Los receptores GPS deben considerar la geometría receptor-satélite visibles utilizada en el cálculo de distancias, ya que una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la

precisión de las medidas. La influencia de la geometría receptor-satélite en la precisión viene cuantificada por un índice adimensional denominado dilución de la precisión (*DOP*, *Dilution of Precision*). La figura 3.11 muestra el principio de la dilución de la precisión geométrica. La posición calculada por los satélites representados en la figura 3.11a presenta una precisión deficiente, ya que los satélites se encuentran muy próximos entre sí. Por el contrario, la posición calculada por los satélites con una configuración tal como la que muestra la figura 3.11b presenta una buena precisión, ya que los ángulos relativos entre los satélites son amplios. Así, cuanto mayor sea el ángulo relativo entre satélites mejor será la geometría, y por lo tanto menor será el valor del DOP, siendo el valor ideal la unidad.

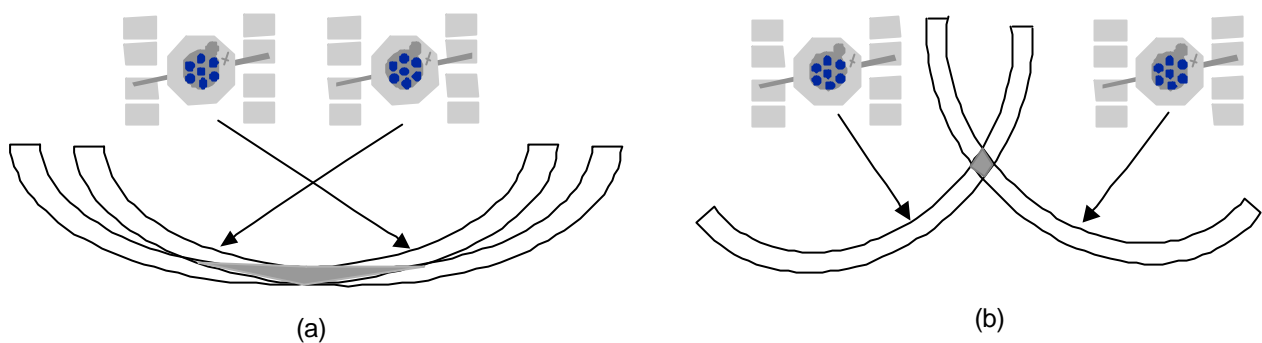


Figura 3.11: Comparación de la dilución geométrica: a) Geometría de los satélites deficiente, b) Buena geometría de los satélites

Los receptores más avanzados computan la posición basándose en todos los satélites a la vista, otorgando diferente peso a cada uno de ellos en el cálculo de la posición según su posición relativa al receptor, de forma que se minimiza el error cometido por dilución geométrica.

El error total en la medida proporcionada por el GPS resulta de multiplicar los errores mostrados en la tabla 3.2 por el parámetro DOP. Los valores de DOP más utilizados son los siguientes:

- **GDOP:** Dilución de precisión en posición y estado del reloj.
- **PDOP:** Dilución de precisión en posición.
- **TDOP:** Dilución de precisión en el estado del reloj.
- **HDOP:** Dilución de precisión en planimetría.
- **VDOP:** Dilución de precisión en altimetría.
- **RDOP:** Dilución de precisión relativa entre dos puntos.

3.2.6 Cuantificación de la incertidumbre en la localización GPS

Debido a las múltiples fuentes de error anteriormente descritas, los receptores GPS posicionan con cierto error, esto es, las medidas que calculan oscilan en torno a un valor. Aparece así una dispersión en la medida que afectará a la precisión del equipo. Una forma común de caracterizar el error es mediante el cálculo del error cuadrático medio (rms), definido como la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado y que puede referirse a una, dos o tres dimensiones.

En aquellos casos donde no interviene la disponibilidad selectiva: receptores GPS/GLONASS, receptores DGPS y receptores GPS en modo absoluto a partir del 1 de mayo de 2000, los errores de posicionamiento en un intervalo de horas se ajustan a una distribución normal⁷.

Así pues resulta válido asumir que cuando se emplean sistemas GPS/GLONASS, DGPS o GPS en modo absoluto tras el cese de la S/A, el error en las medidas sigue una distribución normal en cada eje, por lo que se pueden deducir las probabilidades asociadas a los errores cuadráticos medios. Para el caso de una dimensión, una probabilidad del 95% cae dentro del intervalo $[valor\ medio - 2\sigma, valor\ medio + 2\sigma]$, siendo σ la desviación típica de la distribución. En el caso de dos dimensiones (ejes norte y este), el porcentaje de dispersión que está dentro de un círculo de radio rms depende de la distribución. Si es circular, se corresponde con el 98%. Para el caso de las medidas GPS y GPS/GLONASS la distribución es elíptica, pues la coordenada latitud posee mayor error que la coordenada longitud. Por tanto, la probabilidad asociada será del 95%, que es el porcentaje de una distribución elíptica dentro de un círculo de radio rms [Kaplan 96].

Los fabricantes de GPS emplean como medida estándar de precisión de sus equipos el denominado CEP (*Circular Error Probable*), que se define como el radio del círculo en el que se encuentra la posición exacta en un determinado porcentaje. Se emplean de forma más generalizada el CEP 95% (por su asociación con el rms) y el CEP 50%.

3.2.7 Técnicas de empleo del sistema GPS

Son varias las técnicas que pueden emplearse para el posicionamiento con GPS. Éstas variarán en función de diversos parámetros como son el grado de precisión requerido en las medidas, la necesidad o no de un posicionamiento en tiempo real, coste máximo del sistema, etc. Una clasificación de las distintas técnicas posibles se muestra en la figura 3.12.

El cálculo de posiciones en tiempo real, que es el empleado en esta tesis, puede realizarse bien en modo absoluto o autónomo o bien en modo diferencial. En ambos casos se requiere que el receptor

⁷Antes del 1 de mayo de 2000, al encontrarse activa la S/A, los errores en posición obtenidos por un receptor GPS en modo absoluto estaban dominados por la disponibilidad selectiva y no siempre se ajustaban a una distribución normal.

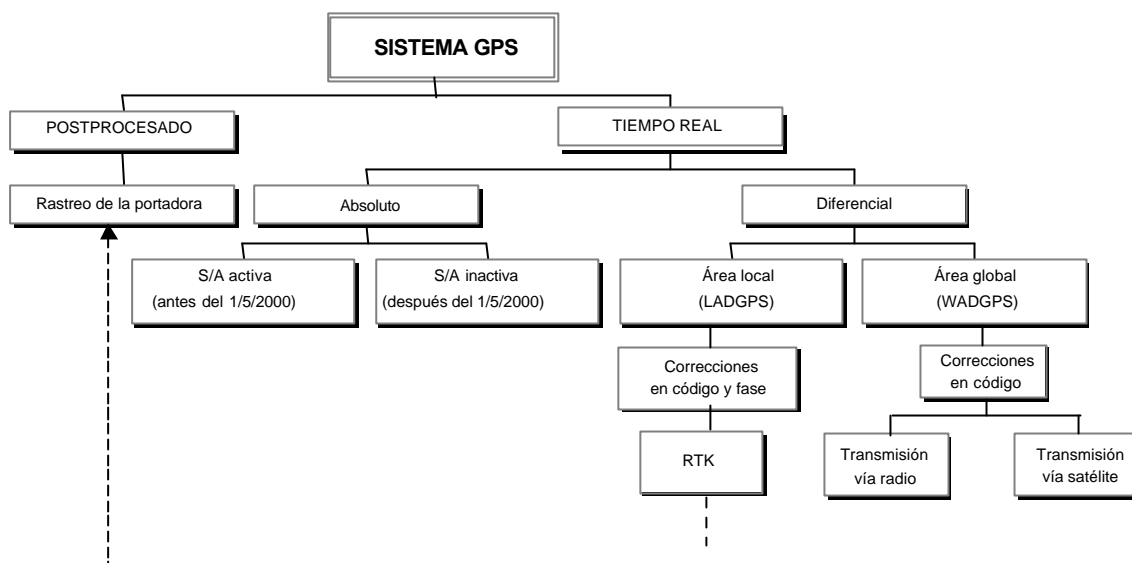


Figura 3.12: Clasificación de las distintas técnicas de empleo del GPS

GPS empleado posee, al menos, cuatro canales⁸, para procesar simultáneamente la señal de los cuatro satélites mínimos que necesita para obtener una posición en el espacio tridimensional (coordenadas longitud, latitud y altitud) (figura 3.7). Si se emplease, por ejemplo, un receptor de un único canal, se realizaría una medición separada para cada uno de los satélites empleados antes de poder calcular la respuesta. La precisión de las medidas estará afectada tanto por el movimiento del satélite durante el cómputo como por el tiempo que tarda en obtener posiciones (en torno a los 30 segundos), debido a las lecturas repetitivas de todos los mensajes de la constelación de satélites con los que posiciona.

Posicionamiento absoluto

El posicionamiento absoluto emplea un único receptor, y consiste en la solución de una intersección directa de todas las distancias receptor-satélite sobre el lugar de estación en un periodo de observación dado (figura 3.13). La medida y la solución son por lo tanto directas.

Para llevar a cabo el posicionamiento, el receptor recibe las señales de los satélites y determina su posición en coordenadas absolutas y en el sistema de referencia al que están referidos los satélites. Se requiere recibir la información de al menos cuatro satélites, ya que cada uno de ellos proporciona una ecuación al sistema y son cuatro las incógnitas a determinar: (x, y, z) y el estado del reloj del receptor (figura 3.4).

El posicionamiento absoluto tiene la ventaja de que con un solo instrumento de observación puede obtenerse la posición. Hasta el 1 de mayo de 2000, la presencia de la S/A en la señal civil

⁸Los actuales receptores GPS cuentan con un número de canales que oscila entre 8 y 12.

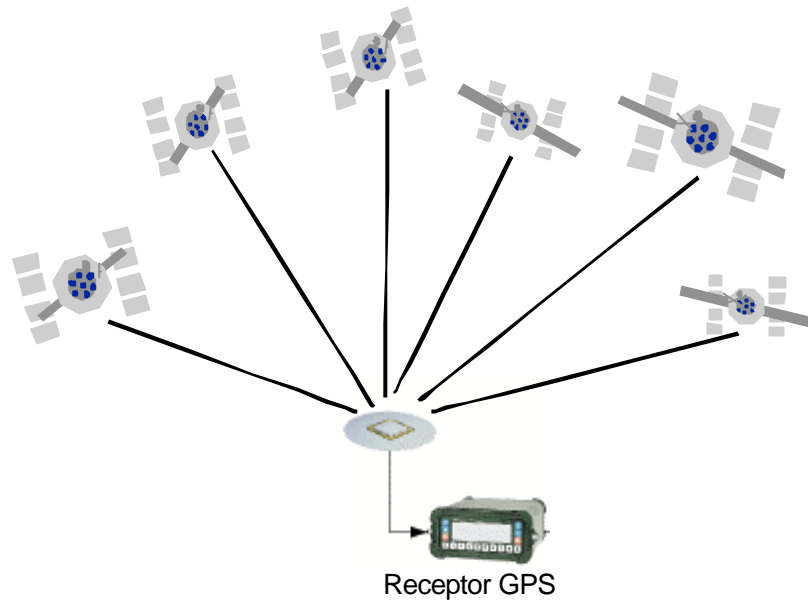


Figura 3.13: Posicionamiento absoluto

originaba grandes errores que hacía inviable su empleo en muchas aplicaciones, resultando útil en otras menos restrictivas como el posicionamiento de barcos, aviones, ocio y todas aquellas aplicaciones donde la tolerancia de error al determinar la posición esté por encima de cien metros. Tras la orden de cese de la S/A, si bien se produce un aumento del 90% en la precisión en modo absoluto, cobran un mayor protagonismo la desviación introducida en el cálculo por el resto de las fuentes de error, tales como retrasos ionosféricos y troposféricos, errores en las órbitas de los satélites, desincronismo en los relojes, etc. (apartado 3.2.5). Así, los errores presentes en las señales de radio GPS han llevado a buscar soluciones para disminuir, en la medida de lo posible, el efecto de las múltiples fuentes de error. Surge así el llamado posicionamiento diferencial [Hofmann 97].

Posicionamiento diferencial

El posicionamiento diferencial tiene como objetivo eliminar los errores presentes en las señales GPS (apartado 3.2.5). Esta técnica emplea dos receptores GPS. Si uno de ellos, denominado base, se sitúa en una posición conocida con exactitud, puede estimarse la aportación del conjunto de estos errores debidos a cada uno de los satélites que el receptor tenga a la vista. Este error estimado se transmite entonces a otros receptores de la vecindad, que pueden aplicarlos a las mediciones de *pseudodistancias* calculadas y mejorar así la precisión en la posición obtenida (figura 3.14). Las correcciones pueden realizarse únicamente en código, obteniendo a lo sumo precisiones en torno al metro, o bien en código y fase de la portadora, lo que permite obtener precisiones centimétricas (sistema RTK, *Real Time Kinematic*) [Dixon 97] [Langley 99]. En uno

u otro caso, este tipo de posicionamiento se denomina posicionamiento diferencial de área local (LADGPS, *Local Area Differential Global Positioning System*), pues transmiten las correcciones diferenciales a receptores cercanos.

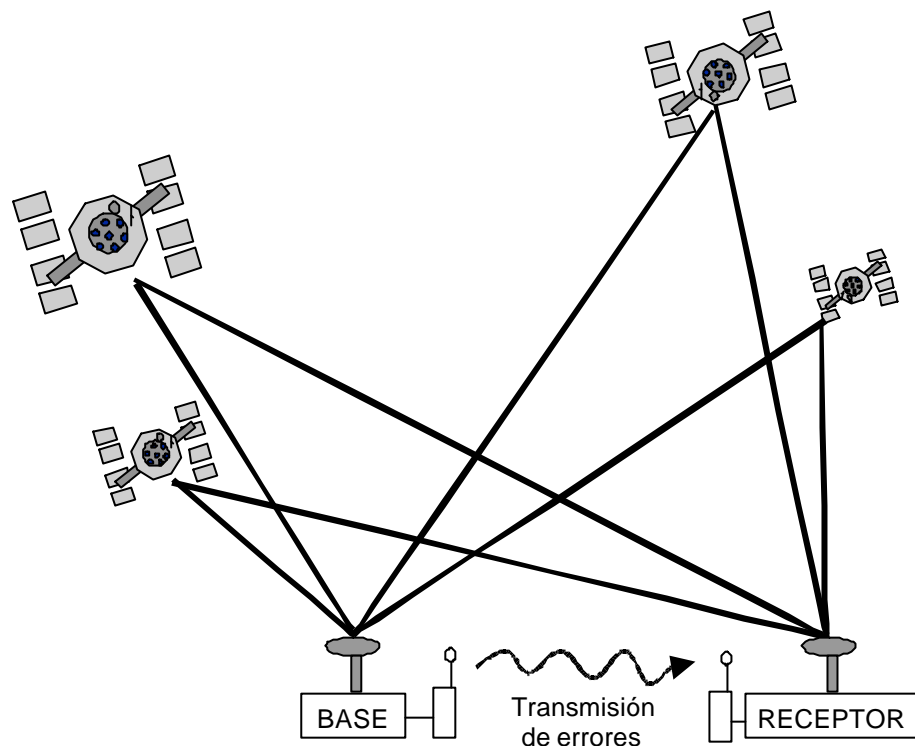


Figura 3.14: Principio de funcionamiento del GPS diferencial de área local

La técnica de corrección de fase de la portadora consiste en determinar la diferencia entre las fases de la portadora L1 transmitida por los satélites y la réplica generada en el receptor. Para explicar su funcionamiento se considerará en primer lugar el caso ideal en el que existe un perfecto sincronismo entre los relojes de los satélites y del receptor y que no existe movimiento relativo entre el satélite y el usuario. En este caso, la medida de fase de la portadora estaría formada por una fracción de ciclo conocida y un número entero de ciclos desconocido⁹.

En el caso real en que la medida de la fase de la portadora se realiza cuando existe un movimiento relativo entre el satélite y el receptor, esta medida vendrá dada por un número indeterminado de ciclos más una fracción de ciclo medido antes del comienzo del movimiento. Así, una vez medida esta fase inicial, el receptor comienza a seguir el cambio de fase en la medida. Este proceso se repite en cada canal para todos los satélites a la vista [Misra 99].

La dificultad de esta técnica está en determinar el número de ciclos enteros de la medida realizada, pues al ser la señal periódica el sistema es incapaz de distinguir entre un ciclo y otro. Para resolver esta ambigüedad se recurre al posicionamiento en código. Como se observa en la figura

⁹Este número entero de ciclos es lo que se conoce como ambigüedad en la medida de fase.

3.15, si la antena receptora resulta estar, por ejemplo, en el origen o fase cero de las ondas enviadas desde los diferentes satélites, habrá un número limitado de puntos (que se corresponden con fases enteras) en los que tal coincidencia es posible. Si el número de satélites es suficiente (mayor que cinco [Fernández 97]), los posibles puntos estarán separados más de un metro. De ahí que, conociendo la posición aproximada de la antena por la técnica GPS diferencial en código, pueda determinarse cuál de los puntos localizados por el rastreo marca la ubicación correcta.

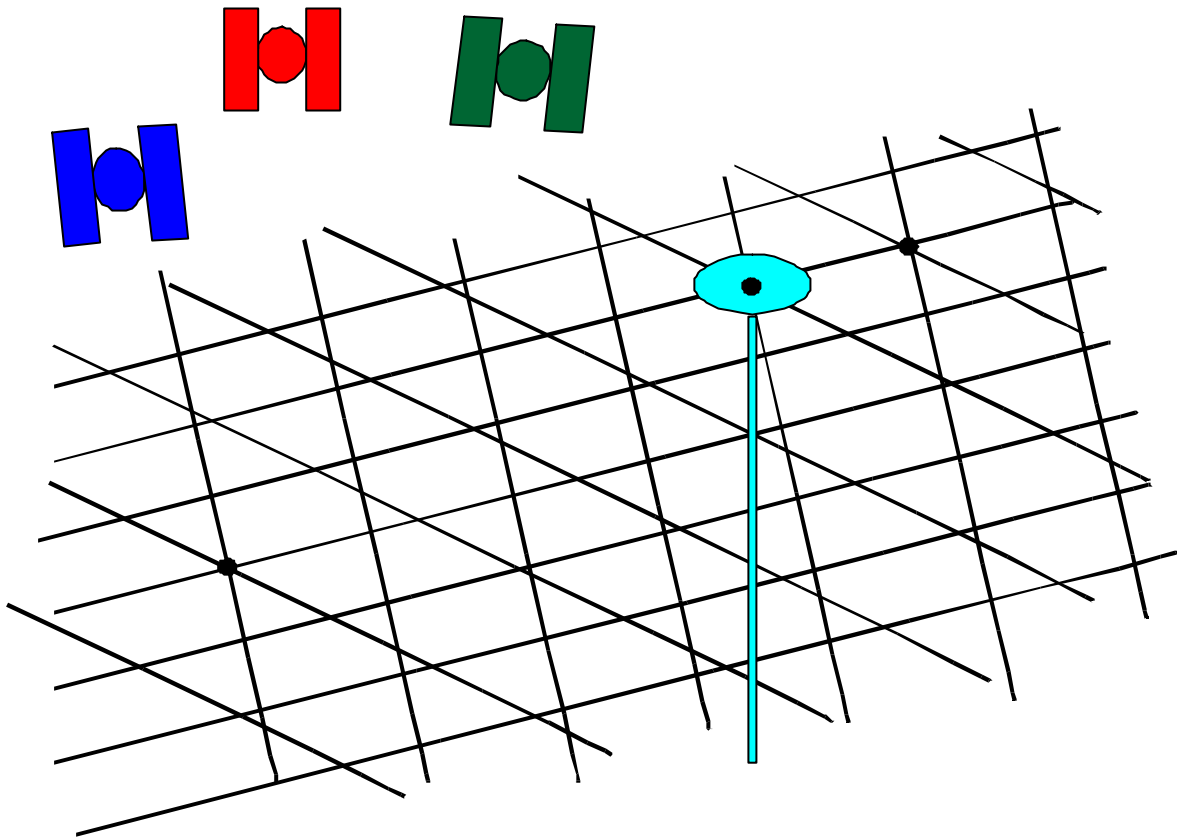


Figura 3.15: Cálculo del valor de la componente entera en el rastreo de la portadora [Herring 96]

La técnica de correcciones diferenciales en código y fase de la portadora resulta válida cuando el receptor y la base se encuentran separados una distancia máxima de 10 km. Este límite en la distancia es debido a varios factores, entre ellos a que los receptores deben estar afectados por los mismos retrasos ionosféricos y que el tiempo entre la generación de la corrección diferencial, donde el volumen de cálculo de las correcciones de fase de la portadora es mayor en comparación con las de código, y la llegada al receptor (*edad de las correcciones*) debe ser mínimo [Langley 99] para obtener precisiones centimétricas.

Otra forma de posicionamiento DGPS en lo que a cobertura de la corrección diferencial se refiere es el denominado posicionamiento diferencial de área global (WADGPS, *Wide Area Differential Global Positioning System*), que ofrece correcciones diferenciales a usuarios situados sobre extensas áreas geográficas como países o continentes. El WADGPS se implementa como un

conjunto de estaciones de referencia que computan las correcciones de todos los satélites que tienen en su campo de visión. Estas correcciones son enviadas a un centro de control, donde se descomponen en los diferentes errores que la constituyen: errores de los relojes de los satélites, atmosféricos, efemérides, etc. La corrección de cada fuente de error se transmite entonces desde un satélite geoestacionario (sistema Omnistar y RACAL) o bien a través de estaciones FM (sistema RASANT) a los usuarios. En cualquier caso, en la actualidad la técnica WADGPS sólo permite correcciones en código¹⁰, por lo que la máxima precisión alcanzada es algo menor al metro.

Por tanto, existen tres formas de llevar a cabo el posicionamiento diferencial en tiempo real (figura 3.12):

- Posicionamiento diferencial de área local, empleando una estación base situada en la vecindad del receptor, que genera correcciones tanto en código como en fase. Las correcciones se transmiten mediante un canal de comunicaciones adecuado: enlace radio, puerto a puerto, red inalámbrica, etc.

- Posicionamiento diferencial de área global:
 - Estableciendo un modelo de corrección a escala mundial y transmitirlo a un receptor situado en una zona concreta por un canal de datos por satélite.
 - Empleando una base de uso público y transmitirlo por un canal de radio con los datos correspondientes a las emisoras locales.

Independientemente de cuál sea la técnica empleada en el posicionamiento diferencial, las correcciones vienen definidas según un código estándar denominado RTCM SC-104 (*Radio Technical Commission Maritime, Special Commite*). La primera versión del protocolo data de noviembre de 1985 y fue posteriormente modificado en enero de 1990 (RTCM SC-104 v. 2.0 [RTCM 90]). La adición de correcciones en fase en los sistemas diferenciales de tiempo real originó en enero de 1994 una ampliación del protocolo RTCM (RTCM SC-104 v.2.1) para incluir los nuevos mensajes [RTCM 94]. En enero de 1998 aparece la tercera versión (RTCM SC-104 v.2.2) [RTCM 98], en la que se definen los mensajes que contienen las correcciones diferenciales para los satélites de la constelación GLONASS.

¹⁰Actualmente, se encuentra en fase de validación el envío de correcciones en código y en fase de la portadora a través del sistema Omnistar.

3.2.8 Algunas aplicaciones de los GPS

Aunque el sistema GPS fue diseñado y concebido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para uso militar en la localización y navegación de tropas a fin de planificar estrategias y tácticas militares, son múltiples las aplicaciones civiles que en la actualidad emplean el GPS. Tales aplicaciones incluyen sistemas de ayuda a la navegación, el modelado del espacio atmosférico y terrestre o aplicaciones con requerimientos de alta precisión en la medida del tiempo. A continuación se detallan algunos de los campos civiles donde se utiliza el sistema GPS.

- **Estudio de fenómenos atmosféricos.** Cuando la señal GPS atraviesa la troposfera, el vapor de agua, principal causante de los distintos fenómenos meteorológicos, modifica su velocidad de propagación [Ware 95]. El posterior análisis de la señal GPS es de gran utilidad en la elaboración de modelos de predicción meteorológica.
- **Localización y navegación en regiones inhóspitas.** El GPS se utiliza como ayuda en expediciones de investigación en regiones de difícil acceso y en escenarios caracterizados por la ausencia de marcas u obstáculos. Un ejemplo son los sistemas guiados por GPS para profundizar en el conocimiento de las regiones selváticas, polares o desérticas [Murphy 97].
- **Modelos geológicos y topográficos.** Los geólogos emplean el sistema GPS para el seguimiento del movimiento, lento aunque constante, de las placas tectónicas, para la predicción de terremotos en regiones geológicamente activas. En topografía, el sistema GPS constituye una herramienta básica y fundamental para realizar levantamientos de terrenos [Martínez R 98] e inventarios forestales y agrarios [Guevara 98] [Manzano 98].
- **Ingeniería civil.** La ingeniería civil hace uso de la alta precisión del sistema GPS para la monitorización en tiempo real de las deformaciones que sufren grandes estructuras ante diversas cargas, como pueden ser las deformaciones que experimenta un puente en función del tráfico que por él circula o las de una torre sometida a fuertes ráfagas de viento [Ruegg 98].
- **Sistemas de alarma automática.** Existen sistemas de alarma conectados a sensores dotados de un receptor GPS para supervisión del transporte de mercancías tanto contaminantes de alto riesgo¹¹ como perecederas: productos alimentarios frescos y congelados. En este caso, la generación de una alarma permite una rápida asistencia al vehículo [Herring 96].

¹¹En este sentido, el IAI-CSIC tiene actualmente en marcha el proyecto de investigación Telematics for Transport-2304, *Multitrack: Supervisión inteligente de mercancías en transporte abierto e intermodal*.

Por otro lado, en Mayo de 1999 el gobierno de la Comunidad de Madrid dio luz verde a un proyecto de alarma automática en taxis, motivado por el aumento en el número de atracos y robos sufridos por los taxistas en esta ciudad. El sistema consta de un receptor GPS con capacidad diferencial, capaz de posicionar al vehículo con un error de 10 m. En caso de robo, un dispositivo activado por el taxista realiza la petición, vía GSM, de la trama diferencial. El GPS calcula la posición del taxi y la envía a la base central. De esta forma, puede conocerse la posición del taxi en situación de emergencia y acudir en su auxilio. El sistema incluye, además, un *kit de manos libres*, que permite escuchar la conversación que se desarrolla en el interior del vehículo una vez activada la alarma. Así, en base a la conversación, pueden descartarse aquellas alarmas falsas activadas de forma accidental. Este sistema ha tenido una gran acogida entre los taxistas y actualmente se encuentra implantado de forma aún experimental en 60 taxis de la Comunidad de Madrid.

En Málaga, la EMT (*Empresa Malagueña de Transportes*) ha dotado a varias líneas de autobuses urbanos de la ciudad de receptores GPS diferenciales, que permiten obtener la posición del vehículo con un error aproximado de 10 m. La posición de cada autobús se envía al centro de control. Esta información permite conocer la existencia de posibles retrasos en la llegada de cada autobús a las diferentes paradas, el tiempo estimado de espera, etc., lo cual se presenta a los viajeros en tierra mediante marquesinas situadas en las respectivas paradas.

- **Sincronización de señales.** La industria eléctrica utiliza el GPS para sincronizar los relojes de sus estaciones generadoras a fin de localizar posibles fallos en el servicio eléctrico [Lewandowski 99]. La localización del origen del fallo se realiza por triangulación, conociendo el tiempo de ocurrencia desde tres estaciones con relojes sincronizados. También se emplea para la estimación de estado en redes eléctricas con fasores [Phadke 93].
- **Guiado de disminuidos físicos.** En la actualidad se estudia el empleo de sistemas GPS para ayuda en la navegación de invidentes por la ciudad [Borenstein 97]. En esta misma línea, la industria turística plantea la posibilidad de la incorporación del sistema de localización en el guiado de visitas turísticas, a fin de optimizar los recorridos entre los distintos lugares de una ruta.
- **Navegación y control de flotas de vehículos.** El sistema GPS se emplea en planificación de trayectorias y control de flotas de vehículos [Guinea 98]. La policía, los servicios de socorro como bomberos y ambulancias, las centrales de taxis, los servicios de mensajería, empresas de reparto, etc., organizan sus tareas optimizando los recorridos de las flotas desde una estación central. Algunas compañías ferroviarias utilizan ya el sistema GPS para localizar sus trenes, máquinas locomotoras o vagones [Infiesta 98], supervisando

el cumplimiento de las señalizaciones [Filip 98].

- **Sistema de aviación civil.** En 1983, el derribo del vuelo 007 de la compañía aérea coreana al invadir, por problemas de navegación, cielo soviético, acentuó la necesidad de contar con la ayuda de un sistema preciso de localización en la navegación aérea. Hoy en día, el sistema GPS se emplea en la aviación civil tanto en vuelos domésticos como transoceánicos [Bauer 95]. La importancia del empleo del GPS en la navegación civil ha impulsado, como se verá en el siguiente apartado, el desarrollo en Europa, Estados Unidos y Japón de sistemas orientados a mejorar la precisión civil de los GPS.
- **Navegación desasistida de vehículos.** Se están incorporando sistemas DGPS como ayuda en barcos para maniobrar de forma precisa en zonas de intenso tráfico [Loeb 95], en vehículos autónomos terrestres que realizan su actividad en entornos abiertos en tareas repetitivas, de vigilancia en medios hostiles como fuego, granadas o contaminación de cualquier tipo [Schönberg 95] y en todos aquellos móviles que realizan transporte de carga, tanto en agricultura como en minería o construcción [Jarvis 95] [Rintanen 96] [Miyake 97] [Aono 98] [Garcia-Alegre 97] [Pozo-Ruz 00b] [Pozo-Ruz 00c] [Garcia-Alegre 01]. La mayoría de estos sistemas emplean receptores GPS de precisión centimétrica. La alta precisión de las medidas ha permitido importantes avances en el espacio de las órbitas bajas y así tareas de alto riesgo de inspección, mantenimiento y ensamblaje de satélites artificiales pueden ahora realizarse mediante robots autónomos [Zimmerman 94].

3.2.9 Futuro del sistema GPS

El cese de la disponibilidad selectiva ha constituido un importante beneficio para los usuarios GPS civiles, que han visto reducido los errores en el posicionamiento desde los ± 100 m. hasta los ± 15 m., aproximadamente. A esto se une el compromiso en el año 1996 por parte de la normativa de regulación de los sistemas GPS de incorporar una frecuencia más para uso civil, además de la hasta ahora vigente. Así, dentro de unos años, los satélites GPS transmitirán código civil en las frecuencias L1 y L2, redundancia que permitirá estimar los errores ionosféricos, proporcionando una precisión en modo absoluto similar a la obtenida con técnicas diferenciales. La señal civil en la frecuencia L1 permanecerá invariable, lo que permitirá a los receptores actuales seguir operativos.

El segmento de control se mejorará con la puesta en marcha de un nuevo sistema de control, actualmente en fase de diseño, para la estación experta, que contempla un total de veinte estaciones monitoras. Con ello se obtendrá un control más preciso de las efemérides y de los relojes de los satélites.

A pesar de estas mejoras en el servicio, la propiedad militar de los sistemas de navegación actuales basados en satélites: el norteamericano GPS y el ruso GLONASS, sigue limitando su empleo en aplicaciones civiles [Parkinson 96]. Por este motivo, diversos países están desarrollando sistemas de complemento al GPS y GLONASS para aplicaciones civiles. Son los llamados GNOS (*Global Navigation Overlay System*), entre los que se encuentran el norteamericano WAAS (*Wide Area Augmentation System*), el japonés MTSAS (*MTSAT Satellite Based Augmentation System*) y el europeo EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) [ESA 99], que estará operativo en el 2003.

Sistema EGNOS

EGNOS es la primera fase del sistema de navegación por satélites de Europa. Su objetivo es la implementación de una red paralela de ámbito europeo que mejore las prestaciones del sistema GPS y GLONASS. EGNOS se desarrolla bajo los auspicios de la Comisión Europea (EC, *European Commission*), la Agencia Espacial Europea (ESA, *European Spacial Agency*) y Eurocontrol, junto a un número creciente de administraciones europeas de aviación civil, entre ellas la española AENA (Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea).

La arquitectura de EGNOS se basa en 34 estaciones de monitorización RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*), repartidas por todo el mundo, aunque con una mayor concentración en Europa. La distribución de las estaciones está diseñada para cubrir dos objetivos fundamentales:

- Proporcionar múltiples medidas sobre un mismo satélite desde localizaciones diferentes, con la máxima separación geográfica entre ellas, para el cálculo de correcciones sobre el reloj y la órbita del satélite.
- Proporcionar una mayor concentración de medidas tomadas sobre Europa, en especial sobre la zona compuesta por los espacios aéreos de los países de la ECAC (*European Civil Aviation Conference*), para el cálculo más preciso posible del modelo de correcciones ionosféricas.

Los datos de satélites recogidos por las estaciones RIMS se envían a un centro de control y proceso (MCC, *Master Control Center*) donde se calibra la información de cada satélite, midiendo el posible error y calcular las correcciones. Éstas se mandan entonces a estaciones en tierra (NLES, *Navigation Land Earth Station*) que las transmiten a dos satélites geoestacionarios: uno Inmarsat-3 y otro Artemis, que distribuyen su señal sobre todo el territorio, beneficiando tanto a

usuarios de navegación aérea como marítima, fluvial y terrestre. El funcionamiento del sistema está representado en la figura 3.16.

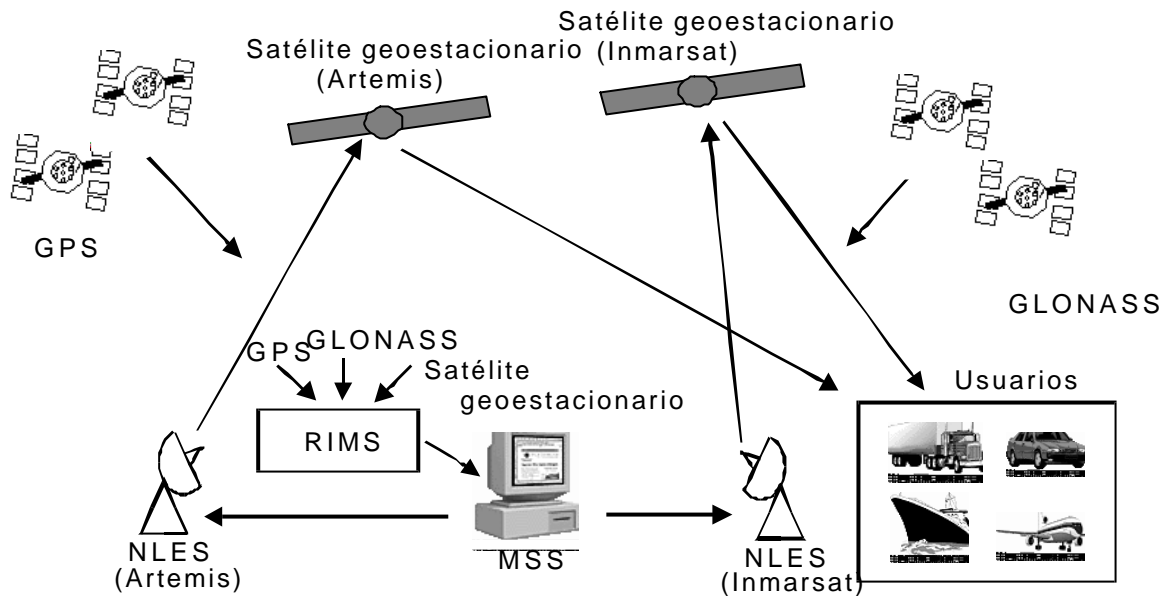


Figura 3.16: Sistema EGNOS

El sistema EGNOS ofrecerá a los usuarios civiles de la navegación por satélite tres servicios añadidos sobre los sistemas GPS y GLONASS [Codina 00].

- En primer lugar, la señal EGNOS permite medir el rango o distancia del usuario al satélite geoestacionario emisor, de idéntica forma a como se hace con los satélites GPS. Así, se dispone de una ecuación más por cada satélite geoestacionario visible para calcular la posición en cada instante, obteniéndose una mejor precisión y fiabilidad.
- En cuanto a la información contenida dentro de los mensajes de EGNOS hay que destacar la de integridad. Este término hace referencia al grado de confianza en la fiabilidad de la información proporcionada por el sistema total. La integridad incluye la habilidad de un sistema de advertir periódicamente a los usuarios cuando el sistema no pueda ser utilizado para la navegación. Se materializa mediante correcciones sobre los satélites GPS y GLONASS e indicará si uno o varios satélites no deben ser utilizados en caso de que estén introduciendo errores demasiado grandes. En definitiva, el servicio de integridad indicará al usuario cómo de fiable es la posición que está calculando.
- El tercer servicio está dedicado a la mejora de la precisión. Los mensajes contienen las llamadas correcciones diferenciales de área extendida, que son unos parámetros que modelan la ionosfera en tiempo real. Con ellos, el usuario puede corregir el retraso ionosférico de las señales de todos los satélites, mejorando su precisión.

Estos tres servicios: rango, integridad y diferenciales, llegan al usuario a través de las medidas que realiza en la señal de los satélites geoestacionarios, junto a la información contenida dentro de los mensajes. Algunos mensajes contienen correcciones sobre los pseudorangos, otros contienen información sobre cómo y cuándo aplicarlas, y otros proporcionan acotaciones de los errores que se cometerán. También existen mensajes reservados para futuros usos.

Una vez que el sistema EGNOS se encuentre operativo, lo cual está previsto para el año 2003, se espera que mejore la precisión estándar de GPS (de 100 m horizontal y 156 m en vertical en presencia de la S/A, y de 15 m en horizontal y 20 en vertical cuando la S/A no está activa) a tan solo 6 m (95%) sobre gran parte de Europa Occidental, con una gran integridad y una alta disponibilidad para aplicaciones civiles como la navegación aérea, marítima y terrestre.

Sistema GALILEO

El sistema Galileo es la segunda fase del uso de la tecnología de navegación por satélite en Europa. El programa Galileo consta de varios proyectos, abarcando diversos aspectos tanto técnicos, económicos y legales, de análisis de mercado o de estandarización y certificación [Durbá 00]. Así, por ejemplo, la definición de la arquitectura global y las especificaciones del sistema se realiza bajo un contrato de la EC denominado GALA; la ESA ha lanzado el proyecto GalileoSat de definición del segmento espacial y de control en tierra; otros proyectos trabajan en la estandarización y certificación, etc.

Previo al lanzamiento del proyecto, se realizaron una serie de estudios destinados a evaluar las necesidades de los usuarios potenciales del sistema. A partir de éstas, se definieron unos requisitos fundamentales que faciliten su uso masivo por la comunidad internacional:

- **Prestaciones.** Las prestaciones del sistema Galileo superarán las del sistema de posicionamiento estándar GPS actual, tanto a nivel de precisión en los datos de navegación como en la disponibilidad, continuidad e integridad del servicio.
- **Cobertura del servicio.** Galileo constará de una constelación de, al menos, 30 satélites en órbita desfilante a 23000 km. de altura. La cobertura será global, incluyendo zonas de latitud alta. Se ofertará tres niveles de corrección de la señal: nivel global, que emplea sólo el sistema Galileo; nivel regional, que hace uso del sistema Galileo más la red de corrección europea; y nivel local, que emplea en las correcciones el sistema Galileo, la red europea y las redes locales (por ejemplo, redes diferenciales).
- **Tipo de acceso.** Galileo ofrecerá dos accesos: acceso libre, disponible de forma gratuita a cualquier usuario (OAS, *Open Access Service*), y el acceso controlado (CAS, *Controlled*

Access Service), que estará disponible bajo contrato ofreciendo una disponibilidad y cobertura legal de responsabilidad de servicio garantizadas.

- **Garantía de servicio.** El control civil del sistema, su certificación y estandarización, la garantía de las prestaciones y servicio hacen este sistema válido para aplicaciones críticas desde el punto de vista de seguridad, tales como aviación civil.
- **Responsabilidad de servicio.** Se ofrecerá un tipo de contrato con regulaciones legales de responsabilidad de servicio, limitando el riesgo comercial en caso de fallos en el sistema.
- **Compatibilidad.** Galileo y el nuevo sistema GPS formarán la nueva red mundial de navegación basada en satélites. Ambos sistemas serán independientes pero compatibles.

El coste total del proyecto Galileo se estima en 3250 millones de euros, de los que 1100 millones de euros serán para el desarrollo (años 2001-2005), 2150 millones de euros para el despliegue (años 2006-2007) y 220 millones de euros anuales para su explotación (año 2008), que se suman a los 80 millones de euros de la definición del sistema. Estos fondos provienen de la iniciativa pública y la privada. Se prevé que el sector privado pueda contribuir con 1500 millones de euros a la financiación de la segunda fase, esto es, la fase de despliegue.

El lanzamiento del proyecto Galileo sitúa a Europa como un claro exponente en el mercado espacial.

3.3 Estudio del GPS para la localización del vehículos autónomos

En las últimas décadas, la navegación de vehículos en exteriores se ha visto potenciada con la ayuda de los sistemas de posicionamiento global mediante satélites. Hasta el 1 de mayo de 2000, la presencia de la S/A hacía prácticamente inviable su empleo para el posicionamiento preciso de vehículos. Tras el cese de la misma, cobran importancia otros errores, ya sean dependientes del modelo del receptor empleado o ya sean derivados de la geometría de los satélites que se utilizan en el cálculo de la posición. Tales errores degradan la precisión obtenida hasta los ± 15 m. aproximadamente. Esta precisión, si bien resulta aceptable para tareas tales como el posicionamiento de barcos, aviones, actividades recreativas, etc., no lo es para aquellas aplicaciones que requieran un posicionamiento más preciso como el guiado de vehículos autónomos. Un estudio de los diferentes parámetros que influyen en el posicionamiento GPS en autónomo, esto es, sin corrección diferencial, estando la S/A activa y tras el cese de la misma se muestra en el apéndice B de esta tesis.

Con la finalidad principal de eliminar el error producido por la S/A entonces activa y, al mismo

tiempo, minimizar otros errores, la comunidad civil recurre al empleo de técnicas diferenciales. El grado de precisión alcanzado depende de la técnica diferencial adoptada y del grado de precisión del receptor, y oscila entre los cinco metros y pocos centímetros en tiempo real (en el 95% de los casos) o incluso milímetros en caso de emplear un postprocesamiento. Sin embargo, a pesar de la precisión conseguida, esta última técnica no es válida para la tarea de la localización de un robot para la navegación autónoma, pues es requisito fundamental el que el posicionamiento se realice en tiempo real.

Como se expuso en el apartado 3.2.7, existen dos formas de llevar a cabo el posicionamiento diferencial: posicionamiento diferencial de área local y global. Independientemente del tipo de posicionamiento diferencial, se requiere el empleo conjunto de un generador de correcciones diferenciales y de un receptor GPS capaz de aceptarlas y de corregir su posición absoluta. Por tanto, la máxima precisión que puede alcanzarse viene impuesta por el que posea menor precisión de los dos.

Así, para lograr una configuración óptima, si se generan sólo correcciones RTCM en código, lo que implica una precisión en el mejor de los casos no superior al metro, se emplearán receptores GPS de menor coste. Sin embargo, si se utilizan en tiempo real correcciones diferenciales en código y fase, el receptor debe estar provisto de un módulo RTK, consiguiéndose posiciones con errores de pocos centímetros, pero el precio del equipo aumenta de forma considerable. Si se generan sólo correcciones diferenciales en código, aunque el receptor GPS estuviese equipado con módulo RTK, se lograrían a lo sumo precisiones del orden del metro.

Se presenta en esta sección un estudio experimental de las diferentes técnicas DGPS para el posicionamiento vehículos autónomos. Para cada una de estas técnicas, se han empleado los siguientes sistemas (una descripción detallada de los equipos utilizados se recoge en el apéndice A de esta tesis):

- Una base generadora de correcciones diferenciales RTCM en código y fase (equipo Z12 [Ashtech 96b]) y un receptor GPS que incorpora el módulo RTK (receptor GPS MS750 [Trimble 98b]). El envío de las correcciones diferenciales desde la base al receptor se realiza a través de la red inalámbrica del IAI-CSIC.
- Un receptor GPS de 12 canales (receptor G12 [Ashtech 96a]), recibiendo las correcciones diferenciales en código a través de un satélite geoestacionario empleando el sistema Omnistar [Huff 95]. El equipo GPS 3100LR12 [Fugro 00] posee incorporado el receptor GPS G12 y la tarjeta decodificadora de la señal Omnistar en un mismo módulo, por lo que este equipo es el que ha sido empleado en la experimentación.
- Un receptor GPS de 8 canales (receptor ACEII [Trimble 98a]), recibiendo correcciones

diferenciales a través de radio comerciales empleando el sistema RASANT [Tecnología GPS 98].

Se describe en esta sección el modo de operación del módulo RTK y del sistema Omnistar y RASANT empleados en la experimentación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con las diferentes técnicas DGPS, que permitirán establecer un criterio de selección del equipo DGPS que se incorporará al robot.

3.3.1 Sistema RTK

El sistema RTK es una técnica de posicionamiento diferencial que consigue precisiones centimétricas en tiempo real [Langley 99]. Se basa en la combinación de correcciones en código y en fase, éstas últimas obtenidas por el procedimiento del rastreo de la portadora (apartado 3.2.7) empleado en técnicas de postprocesado.

El sistema RTK emplea dos receptores, uno base y otro móvil. Para el cálculo de correcciones, debe conocerse con exactitud la posición de la antena del receptor base.

Cada uno de los receptores han de llevar acoplados un sistema para la transmisión y recepción de los mensajes diferenciales bajo el protocolo RTCM SC-104 v.2.1¹²[RTCM 94], si bien algunos modelos más modernos incorporan el sistema de comunicación en el propio receptor. En la experimentación que aquí se presenta, las tramas diferenciales generadas por la base se envían al receptor GPS a través de la red inalámbrica del IAI-CSIC.

En el sistema RTK, las correcciones se actualizan en un tiempo que oscila entre los 0.5 segundos y los 2 segundos, frente a los 10 segundos o más con que se generan nuevas correcciones en código en los sistemas DGPS. Por ello, los mensajes RTCM en código y fase del sistema RTK son transmitidos a una velocidad de, al menos, 9600 bps o incluso 19200 bps.

Para la generación de las correcciones diferenciales debe correlacionarse en el tiempo los datos recogidos en la estación base y en el receptor móvil. Si el cálculo de las correcciones se realizase en postprocesado no existe problema alguno para hacer corresponder en el tiempo, vía software, los datos de uno y otro receptor. Sin embargo, cuando se opera en tiempo real, los datos registrados por la estación base sufren un cierto retraso, denominado *edad de las correcciones*, hasta llegar al receptor situado en la vecindad: deben ser formateados según las exigencias del código, empaquetados, transmitidos y decodificados para que el software del receptor haga uso de ellos para corregir posiciones. Este retraso, que puede superar los dos segundos, ocasiona un error que, aunque puede ser aceptable en aplicaciones estáticas, no lo es en otras que impliquen

¹²Este código es una ampliación del protocolo RTCM SC-104 v.2.0 para incluir los mensajes diferenciales en fase.

movimiento.

Para aplicaciones que requieran correcciones actualizadas constantemente, como puede ser la navegación de vehículos a alta velocidad, el receptor móvil puede extrapolar las medidas que realizó la base, al tiempo en que éste realiza las suyas antes de diferenciarlas. Esta extrapolación se traduce en un error del orden de centímetros cuando la edad de las correcciones es de un segundo.

3.3.2 Sistema Omnistar

Un avance en la aplicación del posicionamiento GPS lo constituye el sistema de correcciones diferenciales vía satélite, que transmiten mensajes RTCM en código, lográndose precisiones por debajo del metro en el 95% de las veces. Entre estos sistemas, se encuentra el denominado RACAL y el sistema Omnistar, si bien este último posee una cobertura mayor. Ambos sistemas requieren de un receptor de pequeño tamaño capaz de extraer la información diferencial de la señal emitida por el satélite geostacionario y transferirla a un receptor GPS a través de comunicaciones serie para que corrija su posición. Existen ya en el mercado receptores GPS con el receptor/decodificador Omnistar incorporado [Fugro 00], que ha sido el utilizado en la experimentación que aquí se presenta. El empleo de un satélite geostacionario para la transmisión de datos asegura la cobertura en toda el área deseada.

Para obtener la precisión submétrica, el sistema emplea múltiples estaciones base repartidas por el área donde se desea proporcionar el servicio. Estas estaciones base siguen a todos aquellos satélites con un ángulo de elevación superior a cinco grados y computan correcciones cada 600 ms, empleando el formato RTCM SC-104 v.2.0 (correcciones en código). Las correcciones se envían al centro de control, donde los mensajes son revisados, comprimidos y empaquetados para enviarlos al satélite geostacionario cada dos o tres segundos aproximadamente. Cada paquete contiene, por tanto, las correcciones diferenciales de cada una de las estaciones base. Cada usuario recibe este paquete de datos desde el satélite geostacionario, lo decodifica y lo descomprime. Una vez realizadas estas operaciones, el mensaje es una réplica exacta de los datos que fueron generados por cada una de las estaciones base (figura 3.17).

El sistema, a partir de la información obtenida y procesada de cada una de las estaciones base, proporciona tramas de corrección en código en formato RTCM que, a través del puerto serie, son aplicadas al receptor GPS. Opera así de forma independiente y con buena precisión sin necesidad de conocer la posición del receptor respecto de las estaciones bases.

A continuación se deben corregir los datos atmosféricos. Cada estación base puede corregir sus propios errores atmosféricos al conocer de forma exacta su posición. Para poder realizar

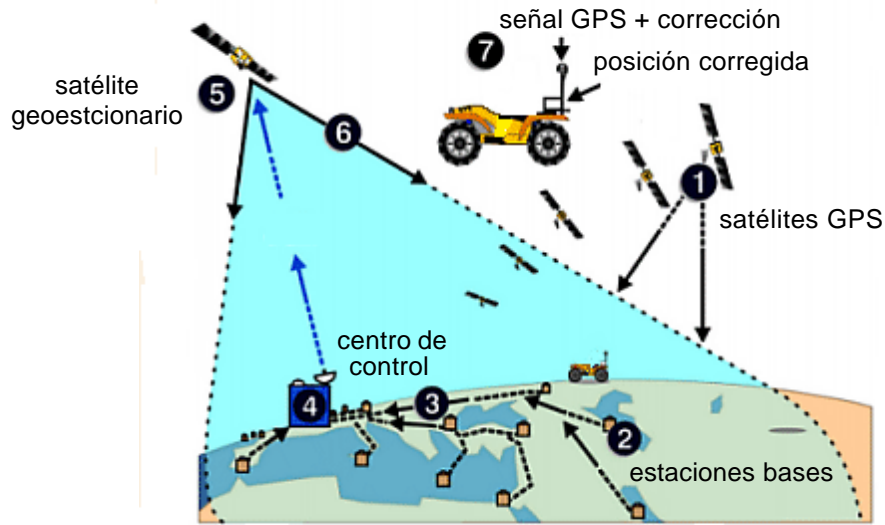


Figura 3.17: Sistema de transmisión de correcciones diferenciales vía satélite [Huff 95]

las correcciones en la posición del usuario, el sistema necesita saber aproximadamente su localización (un margen de 75 km resulta suficiente), siendo el propio receptor GPS de destino el que proporciona inicialmente su posición aproximada.

Esta información es introducida por el sistema en un modelo que traslada las correcciones atmosféricas de cada estación base extraídas del mensaje enviado por el satélite geostacionario, a fin de obtener una corrección para los errores atmosféricos en su propia localización. Una vez eliminados los errores atmosféricos, se corrige la posición calculada por el receptor GPS según la información recibida de cada una de las bases, dando mayor importancia a aquella procedente de bases más cercanas a la posición del receptor.

Por tanto, los sistemas de transmisión de tramas diferenciales a través de un satélite geostacionario funcionan como una *base virtual*, ya que a partir de una posición aproximada calculada por el receptor GPS destino, el sistema proporciona las correcciones diferenciales específicas para esa localización. Se eliminan así los errores debidos a la distancia de separación entre el receptor y la base (errores de *baselínea*), al estar las tramas diferenciales particularizadas en el entorno de vecindad del receptor GPS. De esta forma, posee las ventajas de una estación base fija, donde base y receptor se encuentran en posiciones próximas y las correcciones poseen validez local, y elimina los inconvenientes de esta configuración, como son el conocimiento exacto de la posición de la antena de la estación base y la necesidad de un equipo de comunicación para el envío y recepción de las correcciones diferenciales.

El sistema únicamente proporciona correcciones en código, por lo que alcanzará, a lo sumo,

precisiones del orden al metro, en función de las características de receptor destino. Para la recepción de la señal, el usuario debe pagar una licencia con vencimiento anual.

3.3.3 Sistema RASANT

Actualmente existen en el mundo dos servicios de radiodifusión de tramas diferenciales RTCM en código: el sistema DCI y el sistema RASANT. El primero de ellos sólo está presente en los Estados Unidos, y para su empleo el usuario debe pagar una cuota que varía en función del tiempo de uso de la señal. La tecnología RASANT tiene cobertura en diversos países de Europa: Alemania, España, Dinamarca, Italia, sur de Francia y parte de Holanda, y al contrario del sistema DCI, es de uso gratuito. Se detalla a continuación el modo de operación del sistema RASANT, por ser el vigente en nuestro país.

La tecnología RASANT (*Radio Aided Satellite Navigation Technique*), desarrollada por el LVAN-RW (*Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen*) y por la WDR (*West Deutsche Rundfunk*), es un estándar europeo de radiodifusión de correcciones diferenciales GPS de acceso público, gratuito, y cuyos formatos están abiertos a cualquier institución o empresa que desee integrar soluciones de posicionamiento o navegación GPS [Raven 96].

RASANT utiliza el sistema RDS (*Radio Data System*) de las emisoras de radio FM comerciales como sistema de transmisión de datos, que una vez decodificados, son convertidos en correcciones diferenciales de código en el formato RTCM.

El equipo para realizar posicionamiento GPS diferencial con RASANT consta de un receptor GPS con capacidad diferencial y un receptor RASANT conectado al GPS a través de su puerto serie. El receptor RASANT está compuesto por un sintonizador FM de alta calidad, que realiza un barrido en la banda de frecuencias entre los 87.5 MHz y los 108 MHz, y de un microcontrolador de 16 bits de alta velocidad, que decodifica la señal RDS para generar los datos de corrección RTCM que se transmite al receptor GPS a través de su puerto serie [Riulas 00].

El receptor RASANT puede ser bien adquirido en el mercado, o bien construido por el usuario, previa obtención de la correspondiente licencia de los inventores del sistema (recuérdese que RASANT ha sido diseñado con vocación de servicio público gratuito).

La ventaja de la tecnología RASANT frente al posicionamiento diferencial de área local, al igual que ocurría con el sistema de transmisión vía satélite, reside en que se conecta directamente al receptor GPS, eliminando la necesidad de un sistema de enlace radio para el transporte de las correcciones al receptor móvil [Pedraza 97]. Además, el usuario no requiere conocer la posición en la que se sitúa la generadora de correcciones diferenciales. Sin embargo, a diferencia de las bases

fijas y del sistema Omnistar, las correcciones no se particularizan a la posición del receptor GPS, esto es, la contribución del error de línea de base a la precisión es importante. Las correcciones diferenciales se realizan en código, pero a diferencia de la tecnología Omnistar, la precisión que puede alcanzarse en las mejores condiciones no baja de los 2 m, debido principalmente al error de línea de base y a que las transmisiones terrestres presentan un mayor ocultamiento de campo y menor visibilidad que las transmisiones vía satélite.

En España, el sistema RASANT se encuentra canalizado a través del proyecto RECORD, dentro del programa del Área de Geodesia REPONTE (Red Española para Posicionamiento y Navegación) [RNE 00]. Las correcciones diferenciales en formato RTCM SC-104 v2.0 se generan y comprimen en formato RASANT en el Instituto Geográfico Nacional, donde son enviadas a Radio Nacional de España. Allí, se integran en el servidor RDS encargado de transmitir y mezclar las distintas tramas RDS. Desde Radio Nacional de España se inyectan en el satélite Hispasat y se difunden a los centros emisores. Las distintas emisoras FM difunden las correcciones diferenciales que reciben de Hispasat por la cadena de emisoras de Radio 2 (radio clásica) (figura 3.18). Por tanto, en nuestro país RASANT tiene cobertura donde Radio 2 se escucha con nitidez¹³.

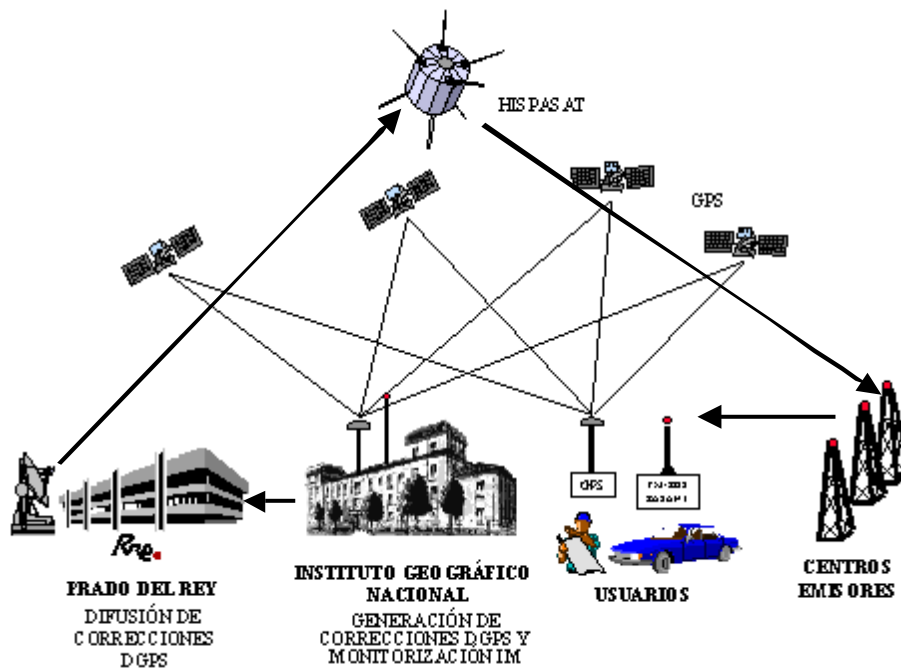


Figura 3.18: Sistema RASANT en España [RNE 00]

¹³Para el territorio nacional insular, existe una emisora en Palma de Mallorca y en Tenerife, que cubre el territorio balear y canario, respectivamente.

3.3.4 Experimentación

Se comentan a continuación los resultados obtenidos al emplear en el posicionamiento cada una de las técnicas DGPS descritas con los equipos presentados.

La toma de datos para cada experimento se ha realizado a una frecuencia de 1 Hz durante 21 horas y media, estando el receptor GPS fijo en una posición determinada. Los datos se representan normalizados respecto de la media del conjunto de valores. De los diferentes experimentos, se muestran aquí algunos de ellos. Las figuras 3.19a y 3.19b muestran, respectivamente, las posiciones en longitud-latitud¹⁴ y la evolución de la altitud con el tiempo obtenidas con el sistema de posicionamiento diferencial RTK. Cuando se emplea el envío de correcciones diferenciales a través del sistema Omnistar, las posiciones en el plano y la componente de altitud quedan recogidas en las figuras 3.20a y 3.20b respectivamente. Por último, las medidas obtenidas empleando el sistema RASANT quedan representadas en la figura 3.21a para las posiciones en el plano y 3.21b para la coordenada de altitud. Las desviaciones típicas en longitud, latitud y altitud, el rms horizontal y los valores del CEP del 50%, CEP del 95% y vertical del 95% quedan reflejados en la tabla 3.3.

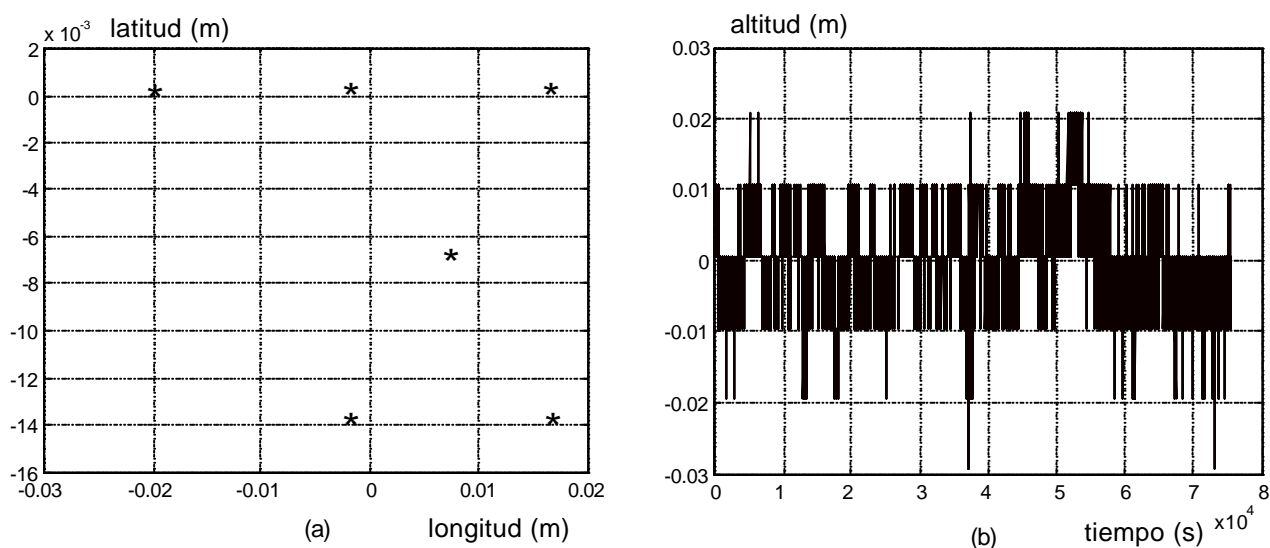


Figura 3.19: Posiciones GPS diferenciales RTK: a) Plano, b) Altitud

En la tabla 3.3 se observa que, efectivamente, para el parámetro CEP del 95%, esto es, el tanto por ciento de veces que las medidas obtenidas por las diferentes técnicas diferenciales de área global se encuentran dentro de un círculo de radio igual al valor del CEP, se corresponden con valores de pocos centímetros para el caso del sistema RTK, algo menor al metro para el caso del sistema Omnistar, y cercano a los 5 m para el sistema RASANT.

¹⁴Cada asterisco representa a muchas posiciones superpuestas.

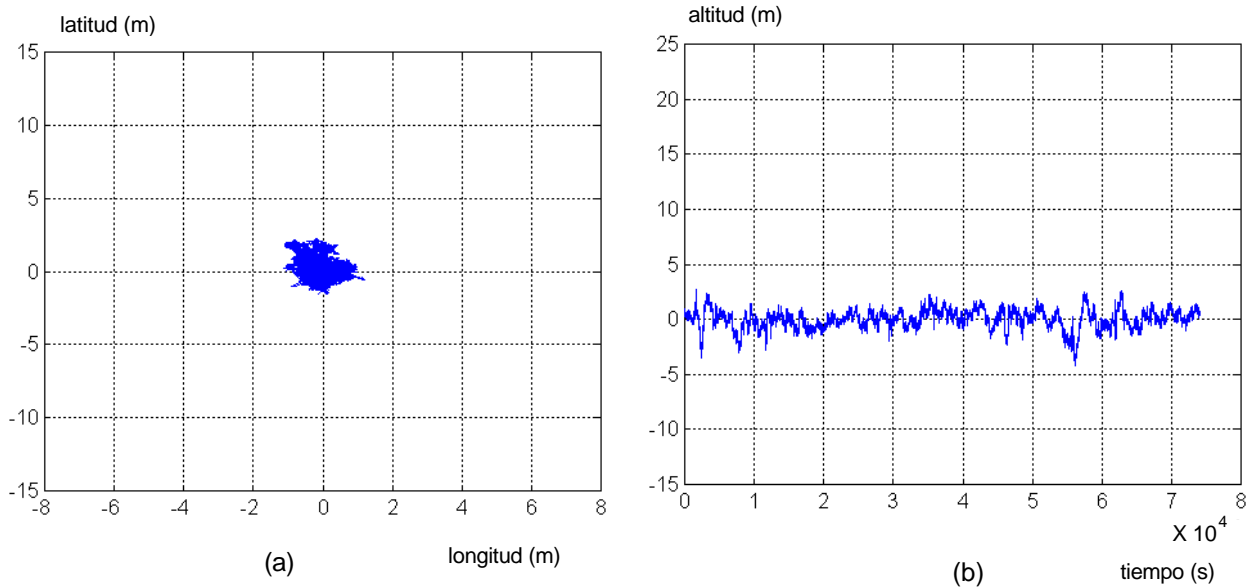


Figura 3.20: Posiciones GPS diferenciales recibiendo correcciones a través del sistema Omnistar: a) Plano, b) Altitud

	RTK	Omnistar	RASANT
Desv. típ. latitud (m)	0.0013	0.32	1
Desv. típ. longitud (m)	0.0056	0.52	1.67
Desv. típ. altitud (m)	0.0069	0.89	2.99
rms horizontal	0.0057	0.61	1.94
CEP 50%	0.0015	0.45	1.25
CEP 95%	0.016	0.98	4.8
Vertical 95%	0.02	1.35	4
Pérdida de tramas diferenciales	0%	0%	0.6%
Precio aproximado (ptas) generador/receptor de tramas diferenciales + GPS	5 millones	1 millón	300000

Tabla 3.3: Medidas de precisión para las distintas técnicas diferenciales de área global

El empleo de una u otra técnica dependerá del tipo de aplicación y de la precisión requerida, teniendo en cuenta que una mayor precisión implica un mayor coste del equipo. Actualmente, el precio en el mercado de una estación base para la generación de correcciones diferenciales en código y fase alcanza los tres millones y medio de pesetas. El precio de un receptor GPS capaz de procesar estas correcciones, esto es, de un receptor que incorpore el módulo RTK, es aproximadamente de millón y medio de pesetas. Por lo tanto, el precio que hay que pagar para obtener precisiones centimétricas, sin contar con el sistema de comunicaciones para la transmisión y/o recepción de mensajes en caso de no venir incorporado de serie, se encuentra cercano a los cinco millones de pesetas (tabla 3.3). Para el sistema Omnistar, un receptor GPS de 12 canales¹⁵ junto con el receptor Omnistar ronda el millón de pesetas (tabla 3.3). Este

¹⁵Se prefiere un receptor de 12 canales a otro de 8 para optimizar la precisión que ofrece Omnistar.

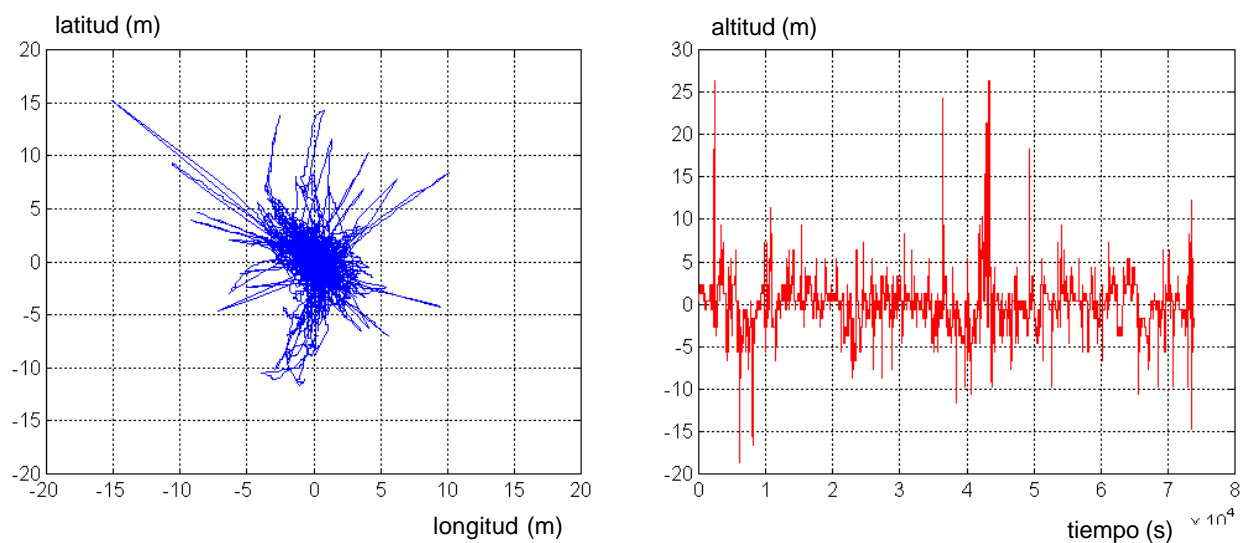


Figura 3.21: Posiciones GPS diferenciales recibiendo correcciones a través del sistema RASANT: a) Plano, b) Altitud

precio incluye el pago de la señal Omnistar durante un año. El coste de la suscripción a la señal Omnistar una vez superado este periodo es de doscientas mil pesetas anuales, si bien se consiguen reducciones importantes en el precio si el usuario se suscribe a la señal por un tiempo mayor al año. Por último, un decodificador RASANT junto a un receptor GPS de ocho canales¹⁶ posee un precio en el mercado de trescientas mil pesetas (tabla 3.3). A esto no hay que añadir el pago de la señal, pues el sistema RASANT es de uso gratuito.

En lo referente al tipo de aplicación, el empleo de una estación base fija en el sistema RTK restringe el área de movimiento del vehículo a un entorno cercano a la misma. Esta técnica requiere conocer exactamente la posición de la antena de la base, por lo que cambiar de zona de trabajo implicaría situar de nuevo la base en un enclave conocido. Además, debe existir un canal de comunicación ya sea por enlace radio, por red inalámbrica, etc., que permita la transmisión y recepción de mensajes diferenciales. Se trata, por tanto, de un sistema poco flexible aunque muy preciso. Puede emplearse, por ejemplo, para el guiado de vehículos en un recinto conocido y no demasiado extenso donde la exactitud en el movimiento del vehículo resulte fundamental: mantenerse siempre en un determinado carril de la carretera pues desviarse del mismo podría significar colisionar con otros vehículos que circulen en paralelo, etc [Reyes 99].

En ocasiones, la navegación de vehículos no requiere una exactitud tan restrictiva. Así, cuando se trata de camiones, tractores, etc., donde las dimensiones del vehículo son considerables y donde el espacio de movimiento es mayor, no se precisan errores de pocos centímetros. En tales aplicaciones basta con realizar correcciones diferenciales en código mediante los sistemas Omnistar o RASANT para cumplir con los requisitos de la tarea. Tales sistemas poseen una

¹⁶La precisión de RASANT no requiere receptores de mayores prestaciones.

gran flexibilidad para aplicaciones móviles, pues no poseen la restricción de una estación base en su vecindad ni de un sistema físico de comunicaciones. El decodificador de los mensajes diferenciales transmitidos por el satélite o vía radio viaja con el propio vehículo, y bien se conectan al receptor puerto a puerto a través de un cable serie o bien van incorporados incluso en el propio receptor GPS.

En el sistema Omnistar, las tramas diferenciales son enviadas a través de un satélite geoestacionario y en el sistema RASANT a través de un canal de radio FM. Aunque ambos sistemas utilizan correcciones en código, con el sistema Omnistar se consiguen precisiones menores al metro en el 95% de los casos, mientras que con el sistema RASANT los errores de posición en el 95% de los casos se encuentran cercanos a los cinco metros. Esto se debe principalmente a dos razones. La primera de ellas es el medio de transmisión de las correcciones diferenciales. La señal procedente de un satélite geoestacionario sufre menos errores multisenda e interferencias que las transmisiones terrestres. La segunda de las razones es que el sistema Omnistar trabaja como una *base virtual* en el sentido de que particulariza los errores atmosféricos a la posición del receptor. En el sistema RASANT no ocurre así, y las tramas diferenciales están particularizadas a la posición de la antena de la base, no a la del receptor que se encuentra además lejos de la base¹⁷. Otro factor a tener en cuenta es la cobertura que proporciona uno y otro sistema. El sistema Omnistar tiene cobertura mundial, mientras que el sistema RASANT, en referencia a nuestro país, tiene cobertura en aquellos lugares donde Radio 2 se escuche con nitidez.

Por último, en lo referente a la pérdida de correcciones diferenciales, en el caso de emplear RTK se producirán si entre base y receptor se interponen árboles o cualquier otro obstáculo que impida la llegada al receptor. En la experimentación que aquí se muestra no ha tenido lugar pérdidas de trama diferenciales con esta técnica al realizarse en un terreno despejado y libre de obstáculos. En el caso del sistema Omnistar, la pérdida de tramas diferenciales es prácticamente nula (en la experimentación que aquí se presenta no ha habido pérdida de tramas diferenciales), pues al transmitirse desde un satélite geoestacionario la señal es más direccional. En cambio, sí se observan pérdidas de tramas diferenciales en el sistema RASANT. Esto es debido sobre todo a la cobertura del sistema. Así, en Arganda del Rey, donde se encuentra el Instituto de Automática Industrial, se ha producido una pérdida de un 0.6% de mensajes diferenciales, aunque en realidad el tanto por ciento de las veces que el receptor no recibe trama diferencial es mayor, pues cuando el GPS pierde corrección sigue empleando la última recibida durante un tiempo de un minuto. Transcurrido este tiempo, si no existe mensaje diferencial disponible, pasa al modo de funcionamiento autónomo.

¹⁷Al no situarse próximos la base y receptor, los errores atmosféricos son a menudo diferentes en una y otra posición, por lo que no se eliminan al diferenciar.

3.4 Recapitulación

El sistema de posicionamiento global mediante satélites, o sistema GPS, es en la actualidad uno de los principales sensores de posicionamiento en exteriores. Son muchas las aplicaciones tanto civiles como militares que emplean el GPS. En este capítulo se ha realizado una revisión del sistema GPS: antecedentes, arquitectura, principios de funcionamiento, fuentes de error, técnicas de empleo, principales aplicaciones y futuro del sistema.

Se ha presentado las diferentes técnicas de posicionamiento diferencial para la localización de vehículos autónomos en tiempo real: empleando una estación base en la vecindad del receptor y un receptor GPS con módulo RTK, mediante un modelo de corrección a escala mundial y transmitirlo al receptor mediante un satélites geoestacionario (sistema Omnistar) y utilizando una base de uso público y transmitir las correcciones por un canal de radio con los datos correspondientes a las emisoras locales (sistema RASANT).

Los datos experimentales obtenidos corroboran que la mejor precisión en las medidas se obtiene mediante la técnica RTK, que emplea correcciones en código y en fase, si bien presenta como principales inconvenientes el elevado coste del equipo y la poca flexibilidad del sistema: se requiere conocer con exactitud la posición de la antena de la base (cambiar de zona de trabajo implicaría situar de nuevo la antena en un enclave conocido) y la necesidad de un canal de comunicaciones adecuado entre base y receptor. Estas circunstancias hacen que el sistema sólo tenga validez en la vecindad de la antena de la base.

En el sistema Omnistar y RASANT el decodificador de correcciones diferenciales se sitúa a bordo del vehículo y se conecta directamente al receptor GPS o puede venir incluso como parte del propio receptor. Estos sistemas realizan correcciones únicamente en código, por lo que la precisión alcanzada es, a lo sumo, del orden al metro para el sistema Omnistar y algo inferior a los 5 m. para el sistema RASANT en el 95% de los casos. El sistema Omnistar requiere el pago de una licencia para su empleo, no ocurriendo así con el sistema RASANT que es de uso gratuito. En lo que a cobertura se refiere, el sistema Omnistar posee cobertura mundial, mientras que para RASANT existen regiones en nuestro país donde las correcciones diferenciales no llegan o bien lo hacen a intervalos.

El estudio que aquí se realiza resulta de gran utilidad a la hora de elegir el sistema GPS a emplear en el posicionamiento de un vehículo autónomo. El empleo de una u otra técnica dependerá del tipo de aplicación y de la precisión requerida, teniendo en cuenta que una mayor precisión implica un mayor coste del equipo.

Capítulo 4

El robot tractor ROJO

4.1 Introducción

Un robot móvil tiene como elemento básico un vehículo que desarrolla su tarea moviéndose, de forma autónoma o con una limitada ayuda humana, en un entorno del que en ocasiones sólo conoce con antelación sus características generales. El tipo de vehículo a emplear dependerá fundamentalmente del entorno en el cual el robot desarrolle su actividad.

En las aplicaciones terrestres de exteriores, que requieren de vehículos robustos capaces de moverse por terrenos abruptos y de adaptarse a la variabilidad de las condiciones climáticas, es frecuente la automatización de vehículos comerciales, tales como automóviles o camiones [Waxman 87] [Pomerlau 93] [Thorpe 98] [Heredia 99] [Reyes 99], más que diseñar y construir prototipos específicos como ocurre en la mayoría de las aplicaciones de interiores. Para la navegación campo a través también se emplean vehículos todo-terreno o tractores con ruedas o pistas de deslizamiento [Schönberg 95] [Jarvis 95] [Elkaim 96] [Rintanen 96] [Marchant 97a] [Caracciolo 99] [Pedraza 00] [Pozo-Ruz 01a] [Garcia-Alegre 01].

Esta tesis, cuyo objetivo es solucionar el problema de la localización precisa de un vehículo en exteriores para aplicaciones agrarias, emplea como plataforma robótica móvil un vehículo tractor-cortacésped comercial de bajo coste, de dimensiones 2m x 0.7 m, tracción a dos ruedas y provisto de un motor de explosión de cuatro tiempos alimentado con gasolina. La automatización del vehículo cortacésped, realizada íntegramente por el Grupo de Percepción Activa del IAI-CSIC, da lugar al robot tractor ROJO [Garcia-Alegre 01] (figura 4.1).

En el proceso de automatización del robot ROJO pueden distinguirse las siguientes etapas (figura 4.2):

- Desarrollo de los mecanismos de actuación, que permiten accionar los elementos necesarios



Figura 4.1: El robot tractor ROJO

para la conducción automática del tractor, esto es, la dirección o volante para controlar el giro y el pedal de embrague para controlar la marcha y parada¹. A esta fase corresponden las tareas de selección de los actuadores más adecuados para los requerimientos del sistema, su instalación y el modo de control de los mismos para lograr las acciones deseadas.

- Percepción del estado del sistema (propiocepción) y del entorno de trabajo (estereocepción), con el fin de lograr un movimiento controlado e inteligente. La percepción se realiza mediante el sistema sensorial a bordo del robot. Dicho sistema, fundamental para el desarrollo de sistemas autónomos, proporciona los patrones que dirigen y modulan el control y permite evaluar el grado de consecución de los objetivos propuestos. A esta etapa corresponden las tareas de la selección de los sensores para el posicionamiento del tractor, problema sobre el que versa esta tesis, y la captura, acondicionamiento, análisis e interpretación de las señales obtenidas.

Tanto la etapa de actuación o acción como la de percepción tienen como soporte físico un sistema de proceso, que por simplicidad se basa en un PC convencional con procesador AMD K6 2. Este sistema recoge las señales de los sensores, las procesa y toma las decisiones de actuación. Ofrece, además, un conjunto de funciones añadidas, tales como la comunicación y la visualización (figura 4.2). La primera de ellas es imprescindible para el control remoto del tractor y para el envío de órdenes. La segunda resulta de gran ayuda en la etapa de experimentación y validación de los resultados obtenidos.

La adquisición de las señales proporcionadas por los diferentes sensores se realiza a través de la

¹Debido a razones mecánicas no se ha automatizado la palanca para la selección de la marcha hacia delante o hacia atrás, que debe activarse de forma manual.

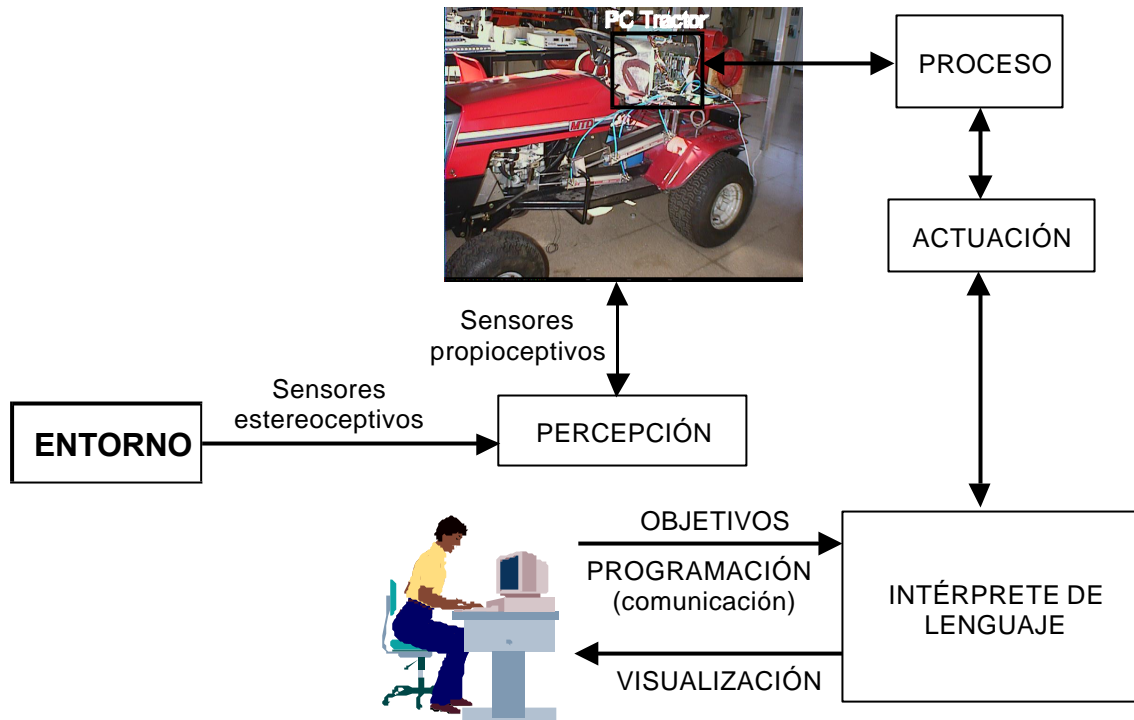


Figura 4.2: Diagrama de bloques del robot tractor ROJO

tarjeta de adquisición de datos PCLab 818HD.

Como sistema de alimentación, el robot ROJO posee una batería de 12 V para el arranque del vehículo y dos baterías de 12 V, colocadas en serie, para la alimentación del PC. De la fuente de alimentación del PC se extraen las tensiones de $\pm 12V$ y $\pm 5V$ para la alimentación de la electrónica incorporada.

Una vez dotado al robot de los actuadores para el control de su movimiento básico y de los sensores para su localización, se ha elaborado un modelo de la cinemática del vehículo que describa su comportamiento cuando se encuentra en movimiento. Tomando como base este modelo matemático, se estima la posición del robot a través de los sensores internos de posicionamiento.

Este capítulo describe el robot tractor ROJO con el que se ha trabajado a lo largo de esta memoria, y se estructura como sigue. En primer lugar se presenta el sistema de actuación para gobernar el movimiento básico del robot ROJO, esto es, el control del volante para el giro y del pedal de embrague/freno para la marcha y parada del vehículo. A continuación, se describe el sistema sensorial incorporado en el robot tractor para la tarea de la localización, y que incluye un sistema odométrico como sensor interno y un receptor GPS como sistema de posicionamiento global. Seguidamente, se presenta la arquitectura cliente-servidor diseñada para el acceso tanto a los dispositivos sensoriales como a los de actuación. Por último, se describe un modelo cinemático del vehículo conocido como "el de la bicicleta" y su aplicación al robot ROJO.

4.2 Sistema de actuación del robot ROJO

Son tres los principales sistemas de actuación utilizados en robótica móvil: motores eléctricos, cilindros hidráulicos y cilindros neumáticos. El empleo de uno y otro responde a aspectos tales como potencia, esfuerzo, velocidad, precio, etc., que variarán en función de la aplicación que se lleve a cabo.

Los motores eléctricos son los empleados con mayor frecuencia por su facilidad de control, alimentación, limpieza, instalación y nivel de ruido [Barrientos 97]. Sin embargo, suministran una potencia muy limitada para ciertas aplicaciones y poseen un precio considerable.

Los actuadores hidráulicos, por el contrario, poseen una alta relación potencia-peso y una gran capacidad de carga. Para la una misma potencia, son mucho más baratos que los motores eléctricos. Ahora bien, al emplear aceites minerales, su instalación y mantenimiento resultan más difíciles. Además, su sistema de control están menos desarrollados y el grado de suciedad en caso de fugas es alto.

Los actuadores neumáticos funcionan de forma similar a los hidráulicos, pero en lugar de aceites minerales utilizan aire a presión (entre 6 y 10 bares). Requieren también de una instalación especial para proporcionar el aire comprimido necesario. Son ruidosos, aunque su principal inconveniente reside en la dificultad de realizar un modelado correcto debido a las múltiples variables involucradas y en la imposibilidad de un control preciso debido a la compresibilidad de los gases.

El robot tractor ROJO lleva incorporado dos actuadores neumáticos: uno para el control del volante o ángulo de giro de las ruedas delanteras y otro para el pedal de embrague/freno, ambos diseñados en el IAI-CSIC. El empleo de actuadores eléctricos quedó descartado porque aquellos que proporcionaban la potencia suficiente para mover el tractor tenían un precio muy elevado en relación al resto de los componentes del vehículo. Los actuadores hidráulicos, además de los inconvenientes mencionados, suministraban una potencia mucho mayor a la requerida para la aplicación.

Los dos sistemas de actuación neumáticos con los que va equipado el robot ROJO constan de los siguientes elementos (figura 4.3):

- Un cilindro neumático, con un pistón en su interior acoplado al actuador físico (volante o pedal de embrague).
- Dos válvulas electroneumáticas, que permiten el paso de un volumen de aire comprimido proporcional al tiempo de apertura de la misma.

Ambos sistemas de actuación comparten, además, un compresor para la generación del aire comprimido y un calderín, situado en la parte trasera del tractor, para su almacenamiento, además de los sistemas de distribución y seguridad (figura 4.3). Las características físicas del actuador neumático se presentan en la tabla 4.1.

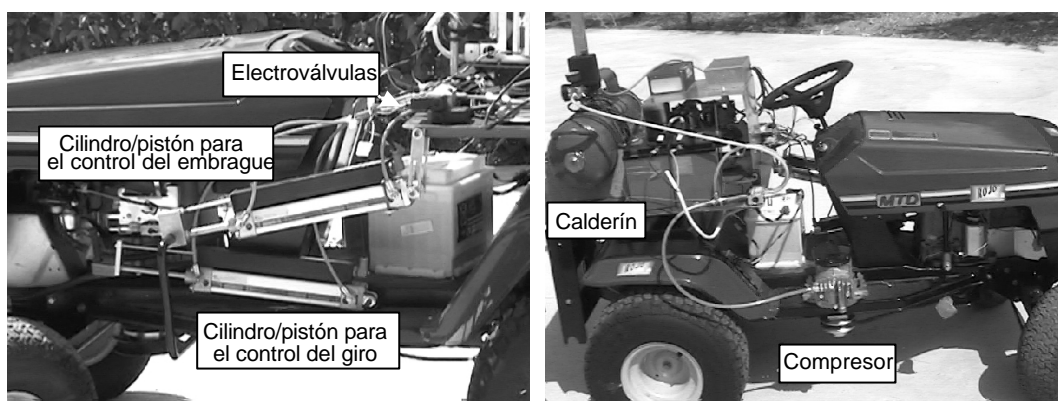


Figura 4.3: Sistema de actuación en el robot ROJO

Diámetro del pistón	32 mm
Diámetro del orificio	0.9 mm
Presión	de 7 a 9 bares
Rango de actuación	200 mm
Diámetro del cilindro	40 mm
Longitud del cilindro	270 mm

Tabla 4.1: Características físicas del actuador neumático

La válvula electroneumática empleada en el sistema de actuación del robot es un dispositivo *todo/nada* alimentado a 12 V [García-Pérez 00]. Se han utilizado dos válvulas electroneumáticas para cada uno de los dos cilindros, una para controlar el volumen de aire que entra en la cámara izquierda del pistón y otra para controlar el volumen de aire que entra en la derecha. Mediante la presión diferencial de entre ambas se gobierna el movimiento hacia delante o hacia atrás del pistón. Así, cuando circula intensidad en la bobina, la válvula está a "1", abriendo la compuerta correspondiente para la salida de aire a presión procedente del calderín a la cámara izquierda o derecha a la cual se encuentre asociada, provocando el movimiento del pistón (figura 4.4).

El control de las válvulas, y por tanto el control del movimiento del pistón, se realiza mediante una modulación de ancho de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*). Para ello, se aplica a la electroválvula un mismo voltaje durante diferentes intervalos de tiempo, controlando así el tiempo en el que la electroválvula está abierta y, por tanto, entrando aire al cilindro (figura 4.5). El ciclo de trabajo (DC, *duty cycle*) se define como la fracción de tiempo en que la válvula se encuentra abierta en el periodo de tiempo, medido en tanto por ciento:

$$DC = \frac{T_b}{T_a} 100 \quad (4.1)$$

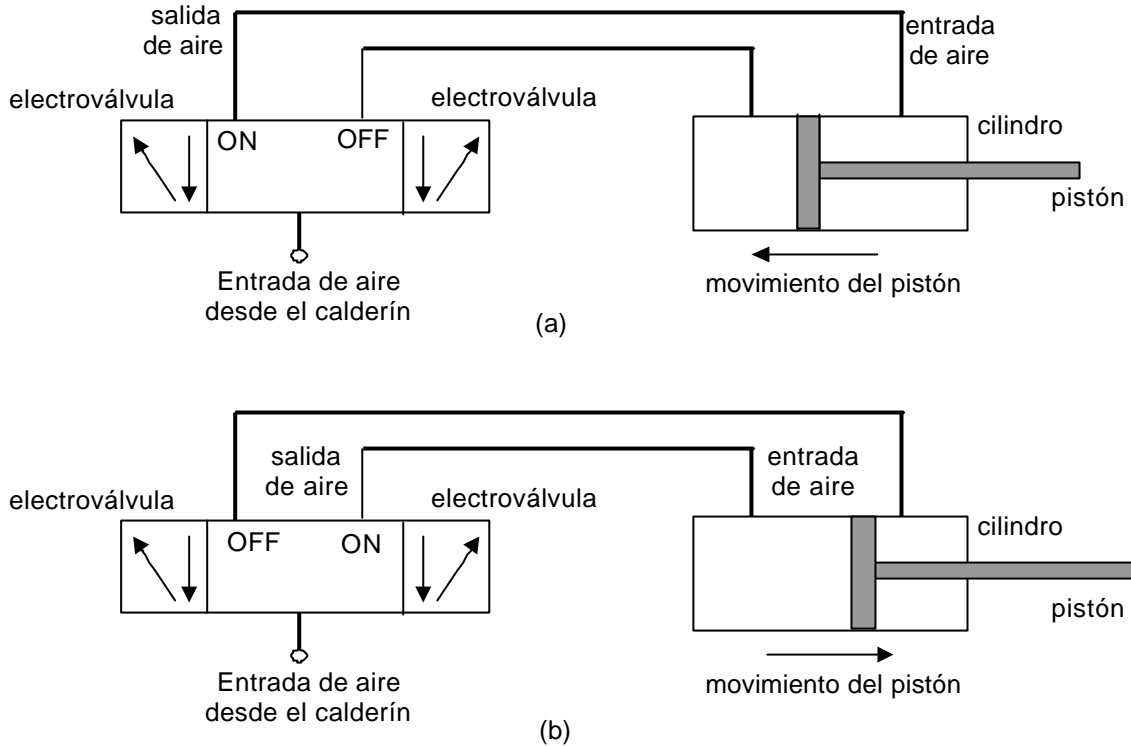


Figura 4.4: Movimiento del pistón: a) izquierda, b) derecha

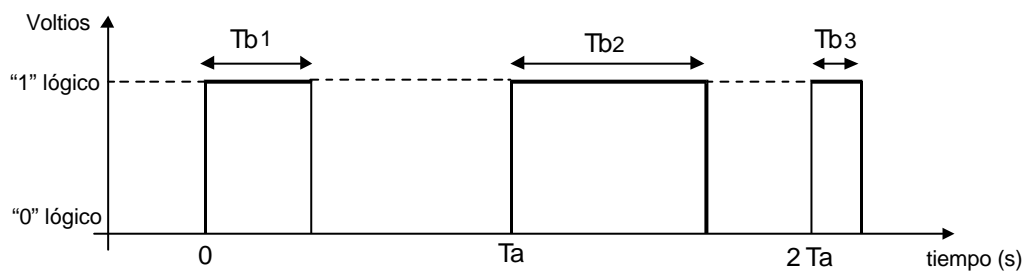


Figura 4.5: Control por modulación de ancho de pulso de las válvulas electroneumáticas

El compresor para la generación de aire comprimido se alimenta de la energía mecánica procedente del movimiento del motor de explosión del tractor. Esto se realiza mediante una correa que transmite la energía del giro del motor de explosión a una polea acoplada al eje del compresor (figura 4.6). De esta forma, siempre que el motor esté en marcha, el compresor se encuentra en funcionamiento y llena de aire comprimido el calderín. Por razones de seguridad, se ha instalado una válvula que impide la entrada de aire cuando la presión interna supera un umbral de 7.5 bares. Un regulador se encarga de la readmisión de aire cuando la presión se sitúa de nuevo por debajo de este umbral.

Los cilindros neumáticos son los encargados de transmitir la presión del aire comprimido que entra en cada cámara al pistón, que actuará sobre el eje del volante para controlar el giro y sobre el pedal del embrague para controlar la parada o puesta en marcha del tractor (figura 4.3). Para conocer el ángulo girado por el volante o la situación del pedal del embrague se precisa de algún

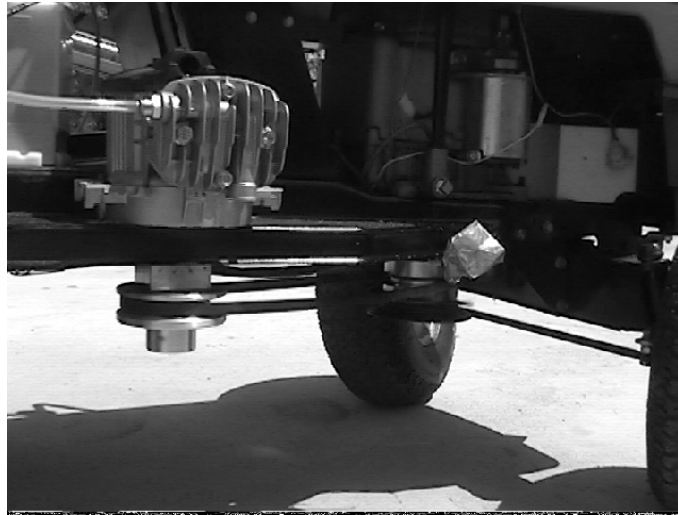


Figura 4.6: Sistema de acoplamiento del compresor al eje del motor de explosión

sensor que permita saber la posición en que se encuentra cada uno de los pistones en cada ciclo de control.

En el robot ROJO, la posición de cada pistón se mide con un sensor potenciométrico de desplazamiento lineal situado encima de cada cilindro, con el vástago solidario al extremo final del pistón (figura 4.7). El movimiento del pistón arrastra al vástago del sensor, esto es, provoca un cambio lineal en la resistencia del potenciómetro con el desplazamiento del pistón. Este cambio en el valor de la resistencia se transforma, mediante un divisor de tensión, en una variación de voltaje, que se registra en la tarjeta de adquisición de señales PCLab 818HD a bordo del robot.

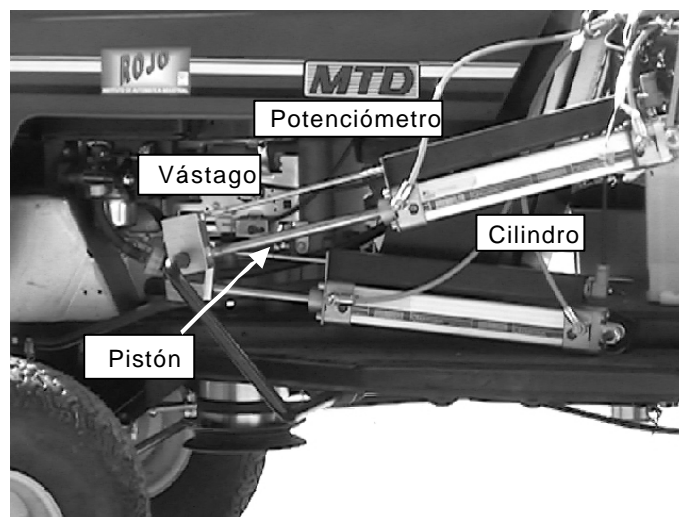


Figura 4.7: Situación de los potenciómetros

La función del pedal del embrague/freno (figura 4.3) es mantener al vehículo frenado al tiempo que se desconecta mecánicamente el motor de las ruedas cuando se encuentra pisado a fondo, y cuando se suelta, permitir su movimiento. Por tanto, el control del cilindro que actúa sobre el

pedal del embrague/freno es del tipo *todo/nada*².

Así, cuando el pistón lleva al pedal al máximo de su recorrido, lo que se detecta por la señal del potenciómetro, el vehículo tiene el freno activado. Por el contrario, si la lectura del potenciómetro indica que el pistón ha llevado al pedal del embrague al extremo contrario, el robot se moverá a velocidad constante, hacia delante o hacia atrás dependiendo de la marcha seleccionada de forma manual. Para llevar a cabo el control *todo/nada* del pedal del embrague/freno, basta tener abierta la válvula electroneumática correspondiente al sentido de movimiento del pistón deseado (frenado del vehículo o desactivación del freno) hasta que el potenciómetro detecte el final del recorrido. Se considera, por tanto, que en un solo ciclo de control se puede exigir al sistema un desplazamiento del pistón de un extremo al otro del cilindro. El correcto funcionamiento del pedal del embrague requiere que el cilindro neumático que lo activa esté situado paralelo al pedal, simulando el pistón el movimiento que realizaría la pierna del ser humano.

Para el caso del control de la dirección, la relación entre la resistencia de salida del potenciómetro, y por tanto del voltaje medido, con el ángulo de giro del volante viene dada experimentalmente por la siguiente expresión [García-Pérez 00]:

$$\alpha = 102.6 V - 93.3 \quad (4.2)$$

donde V representa el voltaje de salida del potenciómetro leído por la tarjeta y α el ángulo de giro del volante, expresado en grados. Si el volante gira en sentido horario, el ángulo medido es positivo. Si se realiza en sentido antihorario, el ángulo se considera negativo. El límite físico de giro de las ruedas es de $\pm 40^\circ$.

El control de la dirección no responde al modelo *todo/nada*, ya que debe poder ordenarse al volante un ángulo de giro cualquiera dentro de su margen físico de funcionamiento. La principal dificultad consiste en conocer qué ancho de pulso T_{b_i} debe aplicarse en cada ciclo de control para obtener el ángulo de giro deseado (figura 4.5). Esto es debido a que el sistema válvula-cilindro neumático-eje de dirección es altamente no lineal y la existencia de muchas variables ocultas, tales como diferente diámetro de los orificios de las válvulas, presión no constante del calderín, la inclinación o irregularidades del terreno, etc., provoca una respuesta no determinista del sistema [Henri 98]. Así, por ejemplo, se comprobó de forma experimental que para intervalos de igual magnitud de la variable DC se obtienen ángulos de giro muy diferentes. Además, no existe una simetría en la respuesta de control en giro hacia la derecha y hacia la izquierda.

Por tanto, la dificultad de encontrar un modelo analítico que describa el comportamiento global del sistema de actuación (válvula-cilindro neumático-eje de dirección) sobre la dirección del

²Aunque el control de la válvula es *todo/nada*, el potenciómetro lineal anexo al cilindro permite un control progresivo del pedal embrague/freno.

vehículo dificulta el uso de técnicas de control clásico que aseguren la respuesta y estabilidad deseadas. Sin embargo, sí es posible encontrar un conjunto de heurísticos capaces de plasmar las acciones a realizar sobre el sistema a partir de un conocimiento *a priori* de los subsistemas que lo componen y a una experimentación adecuada. Por todo ello, se optó por la utilización de un sistema de control basado en conjuntos borrosos y en un conjunto de heurísticos para modelar la imprecisión e incertidumbre inherentes al sistema, que permita tomar decisiones sobre las acciones de control. La característica fundamental del control borroso, frente a cualquier otro tipo de control convencional, es la carencia de un modelo analítico rígido. Esto no implica ausencia del modelo, sino que el modelo se halla embebido en un conjunto de relaciones entre términos lingüísticos, donde cada relación o regla encierra una toma de decisión entre diferentes condiciones o situaciones [Zadeh 73].

Así, para el control de la dirección se ha seleccionado un controlador derivativo proporcional (PD) borroso, donde la salida de control es una función del error y del cambio en el error [García-Alegre 93b] [García-Alegre 98] [Cañas 99] [Reyes 99]. La componente derivativa proporciona una reducción de las oscilaciones y un suavizado de la señal de salida, deseables en la mayoría de las aplicaciones de control.

El controlador borroso diseñado cuenta con dos variables de entrada, error en el ciclo actual $e(t)$ y error en el ciclo anterior $e(t-1)$, y una variable de salida, la señal DC (figura 4.8). Cada una de estas variables posee cinco valores o etiquetas lingüísticas.

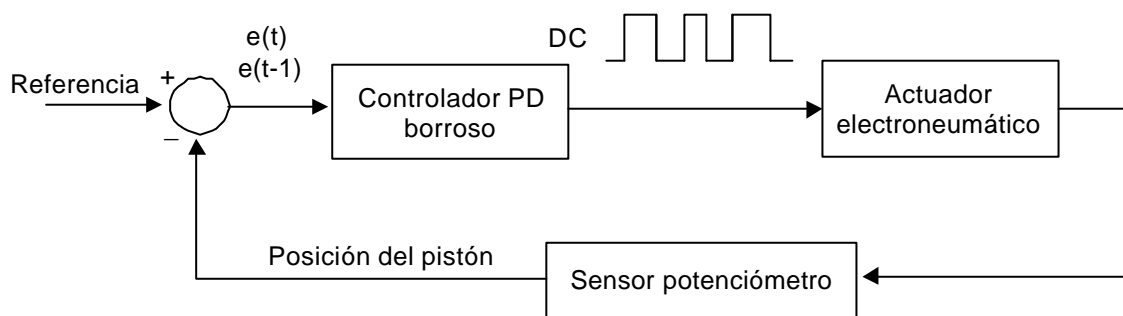


Figura 4.8: Ciclo de control del actuador electropneumático

Las variables de entrada toman valores en el intervalo $[-80^\circ, 80^\circ]$, ya que el ángulo de giro puede variar entre $\pm 40^\circ$. Las etiquetas lingüísticas definidas para las variables de entrada son las siguientes: NEGATIVO GRANDE (NG), NEGATIVO PEQUEÑO (NP), CERO (C), POSITIVO PEQUEÑO (PP) y POSITIVO GRANDE (PG).

La variable de salida, esto es, el ancho de pulso aplicado a las electroválvulas para permitir la entrada de aire y el desplazamiento del pistón, toma valores en el intervalo $[10\%, 80\%]$. El límite inferior del intervalo es debido a la existencia de una zona muerta en la respuesta, que hace que para pulsos de anchura inferior al 10% el sistema no responda. El límite superior del intervalo

es consecuencia de que tanto el cilindro neumático como el propio sistema de dirección tienen un tope, por lo que un ancho de pulso mayor al 80% no originaría desplazamiento alguno.

Las cinco etiquetas lingüísticas para el ancho de pulso PWM son: MUY ESTRECHO (ME), ESTRECHO (E), MEDIO (M), ANCHO (A) y MUY ANCHO (MA).

Tras el análisis del comportamiento del sistema ante un conjunto amplio de condiciones de trabajo y de un proceso de ajuste manual, se llega a la obtención de la base de reglas representada en la tabla 4.2.

$e(t-1) / e(t)$	NG	NP	C	PP	PG
NG	MA	M	ME	M	A
NP	A	E	ME	E	A
C	A	ME	ME	ME	A
PP	A	E	ME	E	A
PG	A	M	ME	M	MA

Tabla 4.2: Conjunto de reglas

Los resultados que se han obtenido con el controlador borroso diseñado para el giro del volante han resultado muy satisfactorios, proporcionando una respuesta adecuada del sistema en un tiempo reducido. Otro aspecto a tener en cuenta es que en el diseño del controlador han primado los criterios de reducción de las oscilaciones y suavizado de la respuesta, frente a los requerimientos de alta precisión. Esto último se debe a que el control se realiza de forma iterativa en ciclos muy cortos, de duración menor a 300 milisegundos, sobre un sistema cuyas holguras mecánicas superan con creces los posibles errores asociados al sistema de control.

4.3 Sistema sensorial para la localización en el robot Rojo

En la sección 2.4.3 del capítulo 2 se justificó la necesidad de emplear sensores complementarios y redundantes al GPS para realizar una navegación segura en un entorno natural. Estos sensores pueden ser los basados en la odometría del vehículo o bien en sistemas de navegación inercial. Se trata de buscar una solución que ofrezca una precisión adecuada para el posicionamiento sin elevar el precio del sistema sensorial, pensando en una salida comercial del tractor.

Para un robot de exteriores, como es el robot ROJO, un sistema sensorial adecuado para la localización consiste en un odómetro como sensor interno y en un receptor GPS diferencial como sensor externo. Un resumen de las características principales de uno y otro sensor se muestra en la figura 4.9.

La odometría y el GPS son sensores redundantes y complementarios, pues estiman la posición instantánea del vehículo por vías diferentes y a diferentes frecuencias. De este modo, mientras

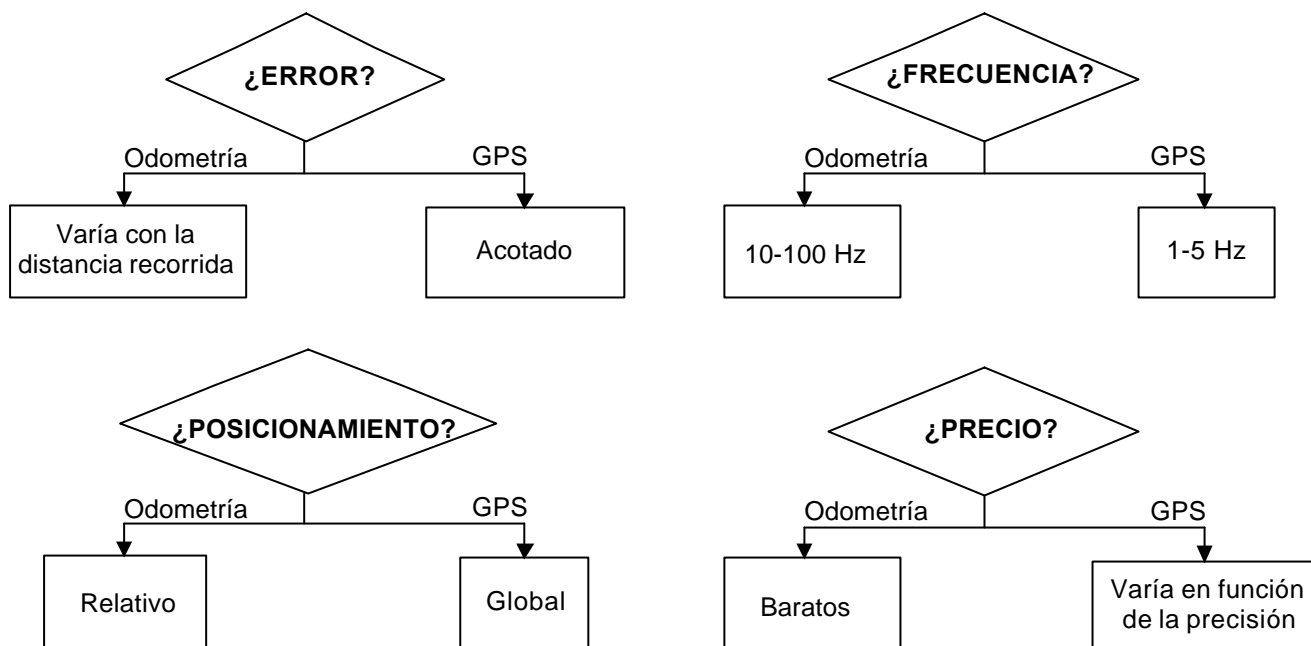


Figura 4.9: Comparación entre la odometría y el GPS

que los sensores internos actúan como estimadores de la posición a frecuencias de 10 a 100 Hz, el GPS calcula la posición en periodos de tiempo más largos [Rintanen 96]. Así, si con estimadores simples y baratos tales como los basados en la odometría del vehículo se obtiene una estimación aproximada de la posición del robot válida para intervalos cortos de tiempo, ya que al ser un sensor relativo aumenta la incertidumbre de la posición conforme el vehículo avanza, ésta puede emplearse como información adicional a la obtenida por el GPS [Abbott 98] [Pozo-Ruz 00b]. En este sentido, el GPS, que es un sistema de posicionamiento global donde el error en el cálculo de la posición no varía con la distancia recorrida por el vehículo, corrige continuamente la estimación proporcionada por el odómetro. Si desaparece la señal GPS durante un periodo de tiempo, la estimación del odómetro será fiable por haberse corregido en cada iteración con las estimaciones previas del GPS.

A continuación, se describe en esta sección el sistema sensorial para la localización empleado en el robot tractor ROJO: sistema odométrico y receptor GPS diferencial.

4.3.1 Sensores odométricos

La odometría está basada en el cómputo de la distancia y el cambio de orientación del vehículo a partir de las vueltas dadas por cada rueda desde una posición inicial (apartado 2.4.1).

Son muchos los sensores que pueden emplearse para estimar la posición del vehículo a partir de las vueltas dadas por sus ruedas. Entre ellos, se encuentran los codificadores ópticos,

magnéticos, inductivos, capacitivos y los potenciómetros. La elección de uno u otro dependerá fundamentalmente del entorno por el que se va a mover el robot.

El robot ROJO, al ser un robot agrícola, desarrolla su actividad en campo abierto. Las características del terreno exige seleccionar un sistema odométrico robusto frente al polvo, la suciedad y, especialmente, a las vibraciones.

Los requisitos de robustez frente al polvo y suciedad hicieron descartar el empleo de sensores ópticos, más adecuados para aplicaciones de interiores. Los potenciómetros tampoco resultaban válidos en esta aplicación, pues la posición del cursor podría verse afectada por las vibraciones del vehículo al moverse por un suelo tan irregular. De entre los restantes, se optó finalmente por el empleo de sensores magnéticos, pues proporcionan una respuesta adecuada a pesar de las condiciones del terreno, y por su facilidad de montaje, empleo y mantenimiento.

Así, el sistema odométrico en el robot ROJO consta de un codificador magnético basado en un sensor de efecto Hall³ [Everett 95], y de 32 imanes colocados radialmente y equidistantes unos de otros sobre un disco o pieza circular situada en la cara interior de cada una de las ruedas de tracción (las traseras) y que gira solidaria a éstas (figura 4.10). Los imanes empleados son bloques de ferrita, imantados de modo que las superficies mayores son una el polo norte y otra el polo sur. El imán se sitúa en el disco de forma que su cara norte quede visible al sensor magnético.

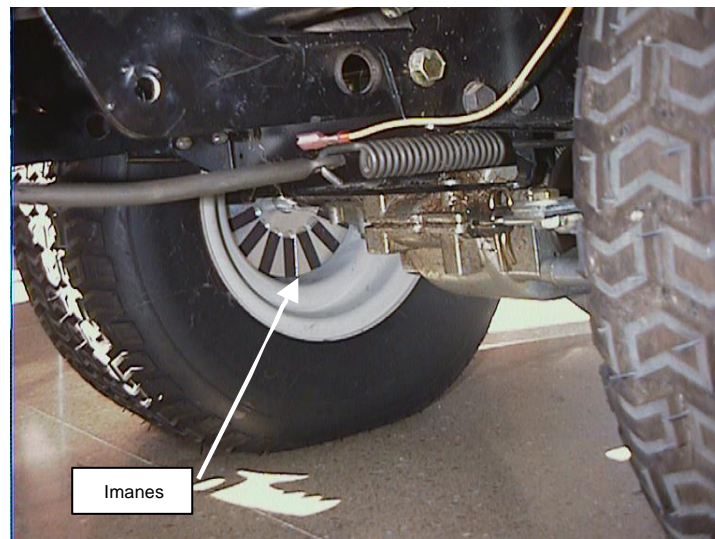


Figura 4.10: Sistema odométrico en el robot ROJO

De esta forma, el sensor, colocado fijo sobre una pieza-soporte situada próxima a los imanes, detecta la presencia y ausencia del campo magnético creado por éstos. El número de picos

³El efecto Hall consiste en la aparición de una tensión transversal en un semiconductor polarizado cuando éste se encuentra en presencia de un campo magnético externo. Este efecto es aprovechado por muchos dispositivos sensoriales para detectar campos magnéticos [Prieto 99].

del vector intensidad de campo magnético se corresponde con el número de imanes detectados. Como la distancia entre imanes es igual al perímetro de la rueda dividido entre 32, la estimación de la distancia recorrida por cada una de las ruedas viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta s_{I/D} = \frac{\pi d}{C} N_{I/D} \quad (4.3)$$

siendo:

- d , el diámetro nominal de la rueda derecha (D) o izquierda (I),
- C , la resolución del codificador o número de pulsos por vuelta (en el caso que nos ocupa, C es igual a 32), y
- N , el número de pulsos contados por el codificador, esto es, el número de imanes detectados por el sensor.

La figura 4.11 muestra la señal de salida del sensor odométrico acoplado a una de las ruedas traseras del tractor cuando ésta ha dado una vuelta completa. Nótese que esta señal de salida consta de 32 pulsos, pues son 32 los imanes situados en el disco que gira solidario a la rueda. El cómputo de imanes detectados se realiza vía software contando el número de veces que el tren de pulsos de salida supera un valor umbral, fijado en 2.7 V (figura 4.11).

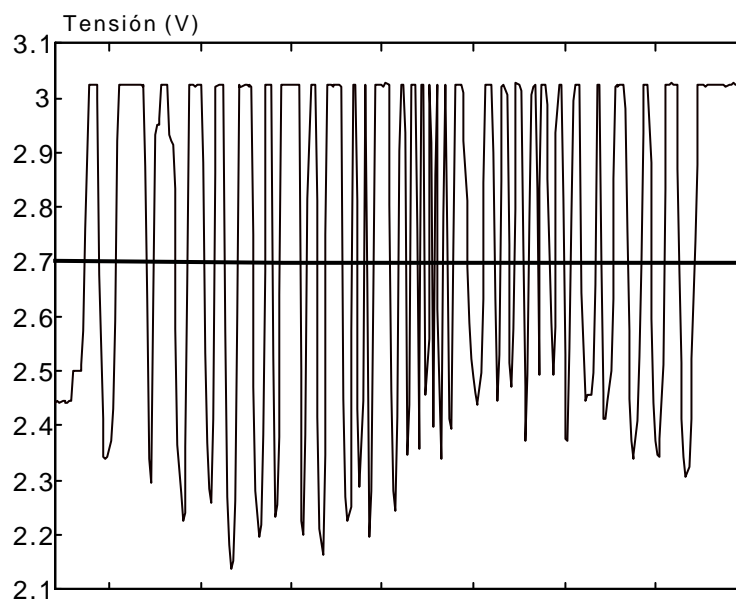


Figura 4.11: Señal de salida del sensor odométrico

4.3.2 Selección del receptor GPS para un tractor autónomo

En las últimas décadas, la navegación de vehículos en exteriores se ha visto potenciada con la ayuda del sistema GPS o sistema de posicionamiento global mediante satélites. En el capítulo 3 se discutieron las diferentes técnicas de posicionamiento DGPS para el conocimiento en tiempo real de la localización de vehículos autónomos. Partiendo de los resultados obtenidos en este estudio, se elegirá el equipo GPS que se integrará en el sistema sensorial de posicionamiento del tractor ROJO.

Así, el sistema GPS a bordo del robot debe elegirse de entre las tres técnicas diferenciales en tiempo real: sistema RTK, corrección diferencial vía satélite o corrección diferencial vía radio en FM.

El sistema RTK ofrece precisiones centimétricas, con lo que el éxito del posicionamiento quedaría asegurado. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, presenta serios inconvenientes que llevan a descartar su empleo. El primer y principal inconveniente es el elevado precio del equipo en relación al resto de los componentes del tractor. Otra desventaja es que requiere un sistema de comunicación entre base y receptor. Además, como la posición de la antena de la base debe conocerse con total precisión, si se quisiese emplear el tractor en otro lugar diferente al de trabajo habitual, debería volverse a calcular la posición exacta de esta antena base.

Por otro lado, como todo receptor GPS, independientemente de las prestaciones del equipo, la señal diferencial puede no llegar al receptor a bordo del vehículo al encontrarse obstaculizada, por ejemplo, por la presencia de árboles. Este caso se muestra en la figura 4.12, donde el sistema RTK pierde la señal diferencial cuando el tractor en su movimiento se sitúa en una zona tal que las copas de los árboles constituyen una barrera al paso de la trama diferencial desde la antena al receptor. Como consecuencia, el GPS comienza a posicionar en modo autónomo o absoluto, esto es, sin corrección diferencial, lo que se traduce en una pérdida considerable de precisión.

Por tanto, la elección del sistema GPS recae bien en las correcciones diferenciales vía satélite o bien en las correcciones diferenciales vía radio FM comercial o sistema RASANT. Ambas opciones presentan como ventaja el no necesitar un equipo de comunicación específico entre el decodificador de trama diferencial y receptor (basta un cable serie entre los puertos de los receptores, y a veces decodificador y receptor se encuentran embebidos en un mismo equipo), lo que no condiciona el sistema a un espacio de trabajo determinado. El precio de estos sistemas disminuye de forma considerable respecto al RTK.

El empleo de tramas diferenciales a través del sistema RASANT es gratuito, si bien no cubren con total garantía la totalidad del territorio nacional. Presenta el problema del error de línea de

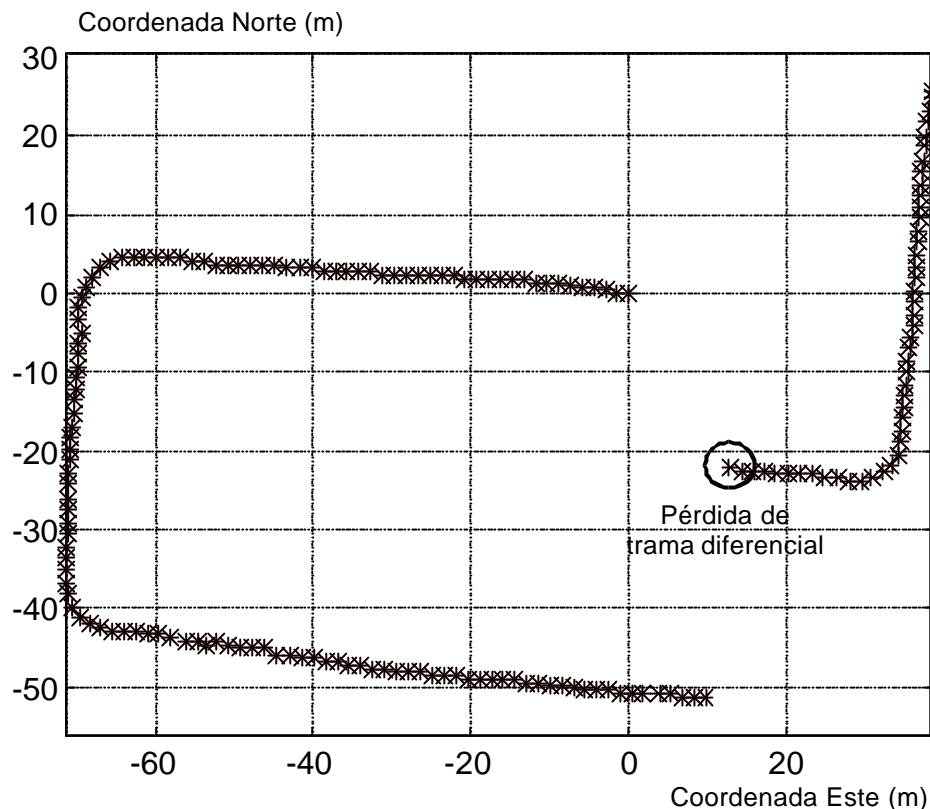


Figura 4.12: Efecto de la pérdida de tramas diferenciales en el sistema RTK

base (error debido a la separación entre el lugar de generación de la corrección diferencial y la ubicación del receptor), así como la pérdida de señal diferencial ya que, al igual que el sistema RTK, las transmisiones terrestres sufren mayores rebotes o errores multisenda que degradan la señal o incluso no permite la llegada al receptor.

Con el sistema de corrección diferencial vía satélite se consiguen precisiones submétricas, que resulta suficiente para la tarea del posicionamiento del tractor. Para su empleo se requiere pagar una cuota anual, cuyo precio disminuye de forma proporcional al número de años de suscripción a la señal. No están sujetas al error de línea de base, pues el receptor trabaja en modo de *base virtual*, esto es, las correcciones se particularizan a la posición donde se encuentra el GPS en ese momento. Omnistar posee cobertura mundial y apenas sufre pérdida de señal diferencial, por transmitirse las correcciones desde un satélite y no desde tierra como el sistema RTK y RASANT. La tabla 4.3 muestra las principales características de cada uno de estos sistemas DGPS.

Así, teniendo en cuenta la precisión y fiabilidad requerida para el robot y el precio del equipo, se ha optado por incorporar en el robot tractor ROJO un receptor GPS diferencial recibiendo las correcciones diferenciales a través del sistema Omnistar. Como receptor GPS se ha empleado el modelo 3100LR12 [Fugro 00], que incorpora un receptor GPS de doce canales (modelo G12

Técnica	Precio	Base (posición conocida)	Equipo de comunicación	Precisión 95%
RTK	Alto	Sí	Sí	Centimétrica
Corrección vía satélite	Medio/alto	No	No	Inferior al metro
Corrección FM	Medio/bajo	No	No	Inferior a 5 m

Tabla 4.3: Comparación entre técnicas DGPS en tiempo real

[Ashtech 96a]) junto a la tarjeta Omnistar [Huff 95]. Una descripción del mismo se recoge en el apéndice A de esta tesis.

4.4 Arquitectura de control en el robot tractor ROJO

Los algoritmos de percepción sensorial, representación del entorno, planificación de tareas y toma de decisión se han englobado bajo una estructura funcional basada en un modelo de agentes de comportamiento que combina los conceptos de modularidad, flexibilidad y eficiencia requeridos en el desarrollo de comportamientos autónomos de vehículos.

La arquitectura AMARA (*Arquitectura Multiagente para Robots Autónomos*), desarrollada inicialmente por el Grupo de Percepción Activa para la navegación de robots móviles en interiores y ampliada para el robot de exteriores ROJO [Guinea 01], es una arquitectura jerárquica multi-nivel basada en agentes de comportamiento. Su objetivo es integrar comportamientos reactivos y planificados, así como establecer un proceso de comunicación entre agentes de un mismo nivel y agentes de niveles diferentes para la navegación de un robot autónomo en un entorno escasamente estructurado [Garcia-Alegre 95] [Garcia-Alegre 97].

Esta arquitectura (figura 4.13) se basa en la descomposición de cada tarea encomendada al robot en subtareas, y en la organización de estas subtareas para alcanzar el objetivo propuesto [Guinea 90] [Watanabe 92] [Guinea 93] [Garcia-Alegre 93a]. Está diseñada, por tanto, siguiendo dos principios básicos:

- Modularidad. La arquitectura implantada debe permitir incorporar fácilmente nuevas funcionalidades (nuevos agentes) si las necesidades así lo requieren.
- Accesibilidad. Al tratarse de un robot móvil, resulta imprescindible tener acceso a toda la información desde otros procesadores externos al vehículo.

En la arquitectura AMARA caben definir tres conceptos fundamentales:

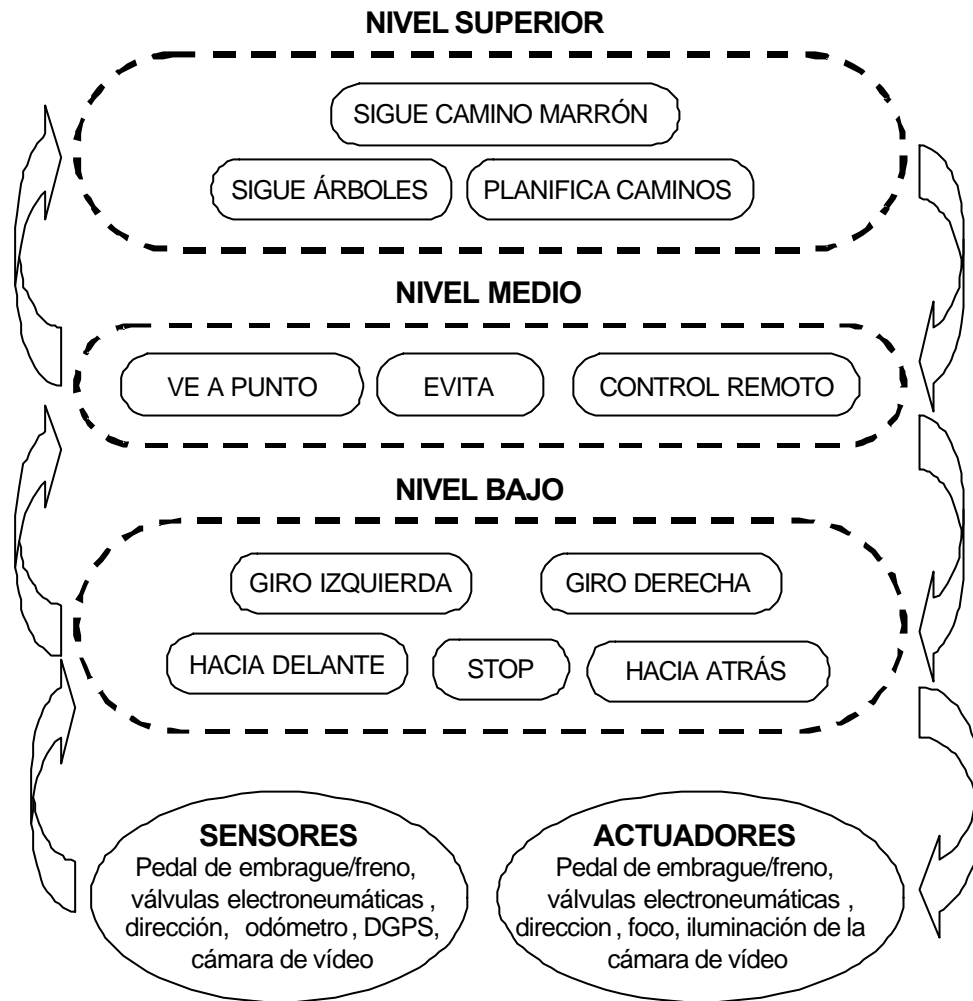


Figura 4.13: Arquitectura AMARA

- **Agente de comportamiento.** Se denomina agente de comportamiento a cualquier proceso o módulo físico o computacional, dotado de capacidad reactiva y planificada definido para alcanzar o mantener un determinado objetivo.
- **Nivel.** Un nivel está constituido por un conjunto de agentes de comportamiento que pueden interactuar entre sí, bien de forma cooperativa o bien de forma competitiva. Los agentes de comportamiento que forman parte de un mismo nivel poseen un estado de abstracción equivalente. En ocasiones, de la combinación o activación temporal de un conjunto de agentes de comportamiento surge otro agente de comportamiento como abstracción de los anteriores, y que se sitúa en un nivel superior. Se trata, por tanto de una jerarquía *bottom-up* en lo que a la abstracción del comportamiento se refiere.
- **Comunicación.** La comunicación se lleva a cabo a través de canales bidireccionales asociados a dos flujos de información: un flujo ascendente, que lleva la información obtenida por los sensores a bordo del robot sobre el estado del propio vehículo y del entorno a los

agentes de comportamiento situados en los diferentes niveles, y un flujo descendente, que aporta la información necesaria al controlador del sistema de actuación del vehículo con la finalidad de alcanzar el objetivo propuesto.

Las relaciones funcionales que se establecen en esta arquitectura son las siguientes:

- La arquitectura se comporta como una arquitectura jerárquica: los agentes de comportamiento se organizan en niveles de forma que los situados en un nivel superior poseen menor prioridad y mayor nivel de abstracción que los situados en los de un nivel inferior.
- El nivel más bajo de la arquitectura engloba los denominados agentes básicos, que constituyen los programas de control a bajo nivel del tractor, la lectura de los sensores y el envío de las señales de actuación básicas (figura 4.13). A partir de estos agentes básicos se construyen tareas más complejas y que conllevan un mayor nivel de abstracción, según la metodología jerárquica definida.
- Existe un flujo de información de abajo hacia arriba (*botton-up*) desde los sensores (nivel inferior) hasta los niveles superiores para monitorizar el estado del sistema y captar situaciones imprevistas, y otro flujo de información de arriba hacia abajo (*up-botton*) desde los agentes de comportamiento de un nivel superior hasta los actuadores para la consecución del objetivo. Este intercambio de información se realiza mediante un conjunto de mensajes predefinidos a través de un canal de comunicación.
- Un agente del nivel i puede enviar mensajes de control al conjunto de agentes situados en los niveles $i-1$.
- Un agente del nivel i envía información al conjunto de agentes situados en los niveles $i-1$ y en el nivel $i+1$.

La arquitectura AMARA diseñada para el robot tractor ROJO consta de tres niveles (figura 4.13), de los que actualmente hemos implementado el nivel bajo y parte del nivel medio. El nivel bajo posee los siguientes agentes de comportamiento básicos: HACIA ADELANTE, PARA, HACIA ATRÁS, GIRO HACIA LA DERECHA y GIRO HACIA LA IZQUIERDA. Basándose en estos agentes básicos, el robot posee ya implementados dos de los agentes pertenecientes al nivel medio, en concreto los agentes de CONTROL REMOTO y VE A PUNTO.

Como toda arquitectura de control, la arquitectura AMARA implantada en el robot tractor ROJO requiere de un sistema de proceso para la ejecución de los diversos agentes de comportamiento y el establecimiento de un lenguaje y canal de comunicación entre ellos. Así, en el robot ROJO,

el sistema de proceso consta de un PC convencional con procesador AMD K6 2, dotado de una tarjeta de adquisición de datos PCLab 818-HD para la lectura de los sensores, y una tarjeta de red inalámbrica WaveLan⁴, que permite una comunicación bidireccional con cualquier puesto de trabajo dentro del IAI-CSIC o fuera de él, del mismo modo que si el sistema de proceso a bordo del robot ROJO estuviera conectado a un punto de la red vía par telefónico. Esto es posible gracias a la estructura de la red local del IAI-CSIC.

La red local del IAI-CSIC se compone de una parte fija y otra móvil, denominada red *aérea*. Al dominio de la red *aérea* pertenecen los PCs a bordo de los dos robots móviles de exteriores que posee el Instituto, robot ROJO y el futuro robot DÉDALO, y el PC encargado de la gestión de las tramas diferenciales RTCM en código y fase para el sistema RTK empleado en otros proyectos del IAI-CSIC. Tanto la red fija como la red *aérea* se encuentran conectadas mediante un PC (PC MAGALLAN) que hace las veces de *router* (figura 4.14).

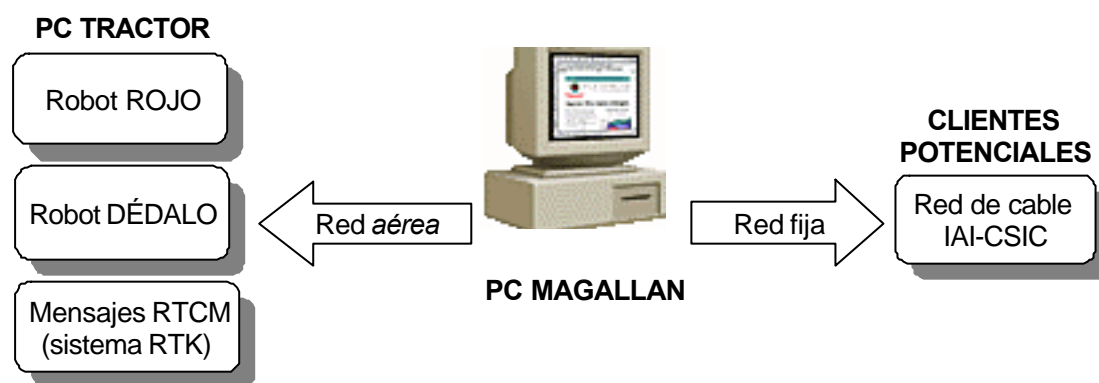


Figura 4.14: Configuración de la red del IAI-CSIC

La posibilidad de comunicación por red desde cualquier puesto de trabajo al sistema de proceso del robot ROJO, apunta a la conveniencia de desarrollar una arquitectura cliente-servidor que permita la comunicación entre los niveles de la arquitectura de un modo flexible. En esta terminología, se denomina cliente al que inicia la comunicación, esto es, al que envía el primer mensaje. El servidor es el que permanece a la escucha hasta recibir este primer mensaje de inicio de comunicación por parte del cliente. Durante el tiempo que dure la comunicación, cliente y servidor intercambian los papeles de emisor y receptor.

En la arquitectura definida, el programa servidor (programa SERVER) es el que reside en el PC a bordo del robot (PC TRACTOR) (figura 4.14). Este programa servidor se corresponde con el nivel bajo de la arquitectura AMARA, esto es, es el encargado de la lectura de los sensores a bordo del robot ROJO y de implementar los agentes de comportamiento básicos HACIA ADELANTE, PARA, HACIA ATRÁS, GIRO HACIA LA DERECHA y GIRO HACIA LA IZQUIERDA. El programa CLIENTE

⁴La tarjeta de red Ethernet WaveLan Card cumple con el estándar IEEE 802.11, similar al Ethernet convencional pero para redes inalámbricas.

agrupa a aquellos programas que, pudiéndose comunicar con el servidor, hace uso de los servicios y agentes de comportamiento básicos que éste implementa. Los distintos programas clientes se corresponden, por tanto, con uno o más agentes de comportamiento situados en los niveles medio y superior de la arquitectura AMARA (figura 4.13). En esta tesis, se ha implementado en un solo programa CLIENTE los agentes de comportamiento de CONTROL REMOTO y VE A PUNTO, ambos pertenecientes al nivel medio de la arquitectura AMARA.

Al ser Windows 95 el sistema operativo del PC TRACTOR, el interfaz de comunicación de red está basado en WinSockets [Quinn 96]. Para establecer la comunicación entre cliente y servidor, es decir, para establecer la comunicación entre niveles de la arquitectura, se ha definido un conjunto de mensajes. Estos mensajes que permiten la comunicación entre cliente y servidor constan de una serie de campos de fácil codificación e interpretación. Su diseño ha sido planteado con vistas a futuras ampliaciones, de manera que la incorporación, por ejemplo, de nuevos sensores permita crear de forma sencilla mensajes que incorporan esta información. Además, al encontrarse asociado cada mensaje a una acción específica, el cliente seleccionará únicamente aquellos que requiera para su tarea, aligerando el volumen de las comunicaciones. Todo el software ha sido desarrollado en el lenguaje de programación C++, con el paquete Builder de Borland.

En esta sección se describen las características principales del programa SERVER y del programa CLIENTE desarrollados como parte de este trabajo de tesis y que forman parte de la arquitectura AMARA incorporada en el tractor ROJO. Una explicación detallada de las funciones del programa cliente y del programa servidor, así como del conjunto de mensajes que se ha definido para permitir la comunicación entre ellos, se presenta en el apéndice D.

4.4.1 Programa servidor

El programa servidor (programa SERVER) instalado en el ordenador TRACTOR a bordo del robot ROJO, tiene dos objetivos fundamentales:

1. Adquirir las señales de todos los sensores con los que está dotado el robot ROJO y enviarlas a los clientes que las soliciten.
2. Generar las referencias de control de la dirección del robot y la parada/marcha del vehículo, esto es, realizar el control de movimiento básico o de más bajo nivel.

Atendiendo a estos dos objetivos, el conjunto de tareas que debe realizar el programa SERVER son las que se enumeran a continuación:

- Apertura de los puertos de la tarjeta de adquisición de datos PCLab 818HD para la lectura de los voltajes y del puerto serie del PC para la recepción de los mensajes procedentes del GPS.
- Lectura del puerto serie e interpretación de los mensajes GPS.
- Lectura de los voltajes correspondientes al resto de los sensores a bordo del robot y procesamiento de la señal para extraer la información sensorial deseada.
- Atención e interpretación de los mensajes de los clientes.
- Envío de los datos a los que cada cliente se ha suscrito.
- Realización del control básico del giro y de la parada/marcha del robot.
- Control de errores, comunicando todas las posibles anomalías que puedan producirse en la lectura y escritura a través de la tarjeta de adquisición de datos.

Un esquema con las principales tareas de SERVER se muestra en la figura 4.15.

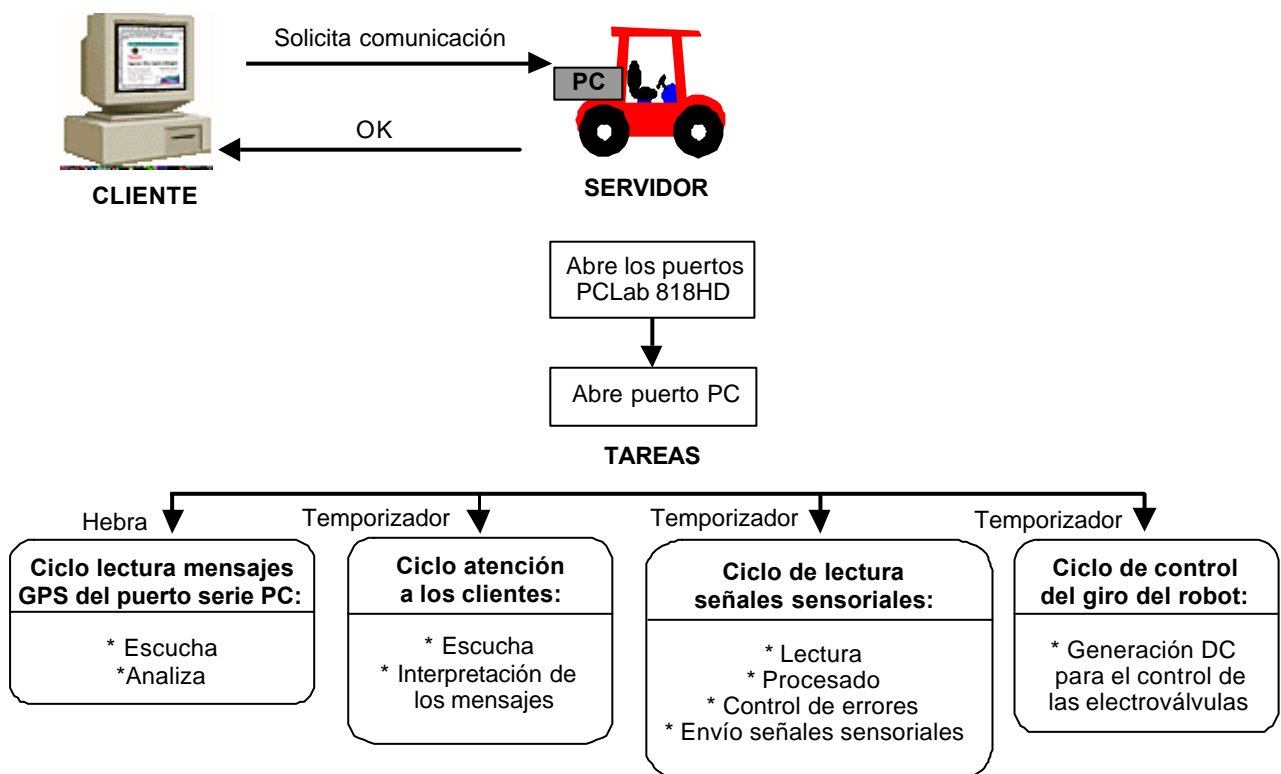


Figura 4.15: Tareas de SERVER

En el momento en que SERVER recibe una conexión por parte de un cliente la procesa y, si se ha efectuado correctamente, envía al cliente un mensaje de *OK* (figura 4.15). Con ello, el servidor indica que está disponible para procesar los siguientes mensajes que reciba de este cliente. Al

conectarse el primero de los clientes, el servidor realiza la primera de las subtareas descritas, esto es, la apertura de los puertos de la tarjeta de adquisición de datos para la lectura de los diferentes voltajes y del puerto serie del PC para la recepción de los mensajes procedentes del GPS.

Las restantes subtareas se agrupan en el código fuente del programa SERVER en una hebra para la lectura del puerto serie y en tres temporizadores. Una hebra es un programa que, creado en el programa principal, se ejecuta en paralelo con éste en función de la prioridad asignada siempre que ocurra el evento asociado a la hebra, en este caso, la llegada de un carácter al puerto serie del PC. En un temporizador, por el contrario, el código situado en su interior se ejecuta cada vez que se cumple el tiempo asignado al temporizador, esto es, funciona como si se tratase de un ciclo de control independiente dentro de un mismo programa. La hebra y los temporizadores realizados en el programa SERVER y las diferentes subtareas que incorporan son las siguientes (figura 4.15):

- Ciclo de atención a los clientes. Es un temporizador que se activa cada 100 ms, y comprende las siguientes subtareas:
 - Comprobar la llegada de mensajes de los clientes.
 - Interpretar los mensajes recibidos de cada cliente. En caso de que el mensaje recibido sea el de marcha/parada del tractor, la orden se ejecuta en este ciclo de atención a los clientes.
- Ciclo de lectura de las tramas GPS recibidas por el puerto serie y análisis del mensaje para extraer la información relevante. Es una hebra que se activa cada vez que llega un carácter al puerto serie del PC.
- Ciclo de lectura de las señales sensoriales obtenidas a través de la tarjeta de adquisición de datos, procesado de la información y envío a los clientes. Es un temporizador que se activa cada 10 ms y consta de las siguientes subtareas:
 - Lectura de los voltajes de cada canal de la tarjeta de adquisición de datos.
 - Procesado de los voltajes para extraer la información sensorial útil.
 - Control de errores en el acceso a la tarjeta de adquisición de datos.
 - Envío de todas las señales sensoriales (incluida la del GPS) a los clientes que así lo hayan solicitado.
- Ciclo de control del giro del robot. Es un temporizador que ordena la apertura y cierre de las electroválvulas que regula la entrada de aire que permite el movimiento del pistón

de dirección. El control sobre las electroválvulas se realiza a través de la modulación de ancho de pulso, implementado vía software con dos temporizadores enlazados.

El programa SERVER dispone de un interfaz con el usuario donde se monitoriza la información, ya procesada, de los diferentes sensores a bordo del robot y los diferentes errores que pueden producirse en el acceso a la tarjeta de adquisición de datos. Este interfaz se muestra en la figura 4.16.

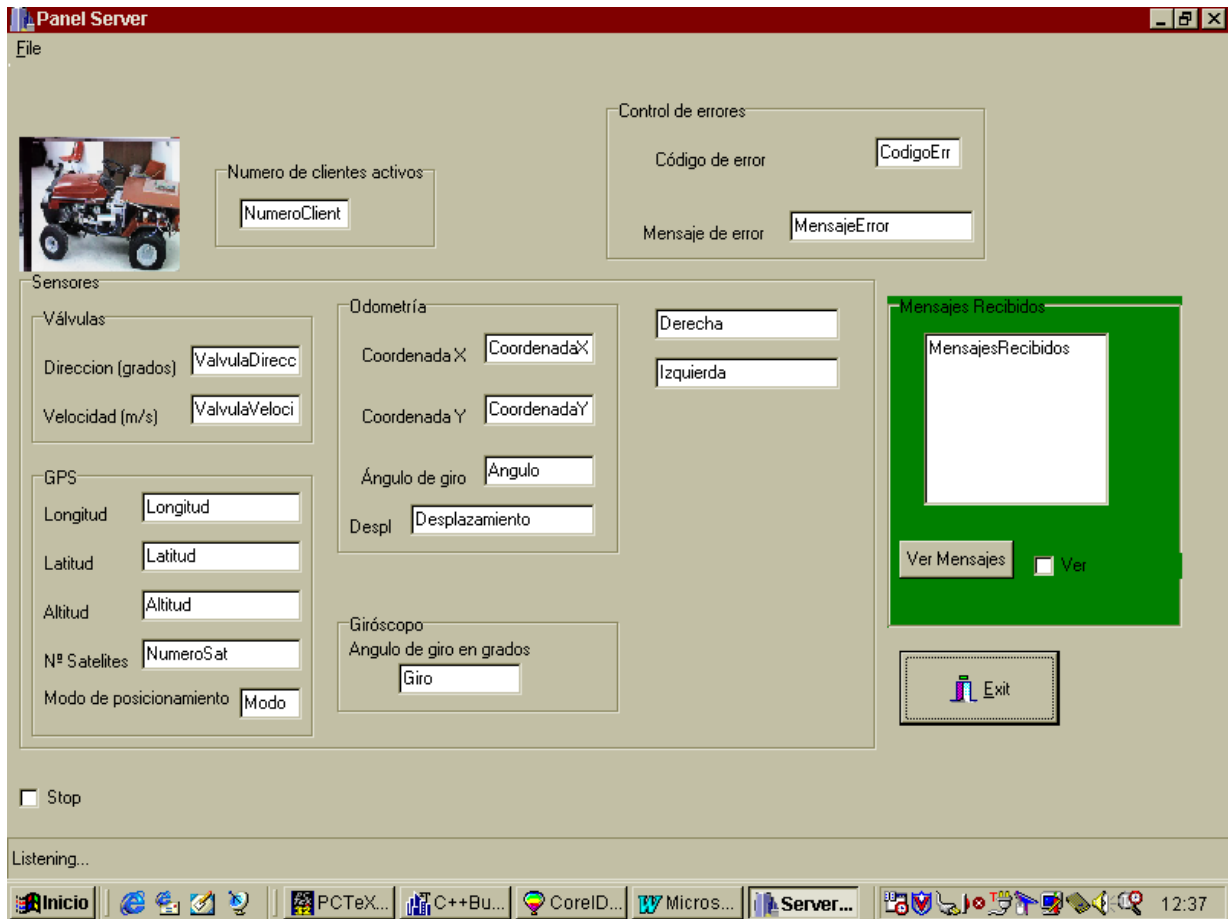


Figura 4.16: Interfaz del programa SERVER con el usuario

4.4.2 Programa cliente

Bajo la denominación de programa CLIENTE se agrupan aquellos programas que, pudiéndose comunicar con el programa SERVER vía *socket*, hacen uso de alguno de los servicios que éste ofrece. Por tanto, los programas CLIENTE se corresponden con agentes de comportamiento situados en los niveles medio y superior de la arquitectura AMARA .

Cada programa CLIENTE se diseña para una o varias tareas: gobierno del movimiento del tractor, monitorización de las señales sensoriales, control remoto del vehículo, etc. Sin embargo, a pesar

de la distinta funcionalidad de cada CLIENTE, todos ellos deben cumplir unos protocolos comunes definidos en la arquitectura que permita su comunicación con un mismo servidor, esto es, con el nivel inferior de la arquitectura. Así, todo cliente debe poder acceder al programa SERVER vía WinSocket. Para ello, debe existir una conexión a Internet entre ambos nodos. De hecho, cualquier ordenador con acceso a Internet puede alojar un programa CLIENTE. Además, para que la comunicación sea posible, servidor y cliente deben enviar sus mensajes según la sintaxis y formato que para tal fin se ha diseñado (apéndice D).

Las características y funciones comunes de todo programa CLIENTE diseñado para la tarea de la navegación autónoma del robot son las que se muestran a continuación (figura 4.17):

- Establecimiento de la conexión con el servidor (programa SERVER).
- Suscripción y desuscripción a las señales sensoriales. En caso de haberse suscrito a una o varias señales sensoriales, interpretación de los mensajes relativos a la información sensorial recibida del servidor.
- Grabación de los datos sensoriales en ficheros de texto.
- Visualización del recorrido que sigue el tractor en su movimiento.

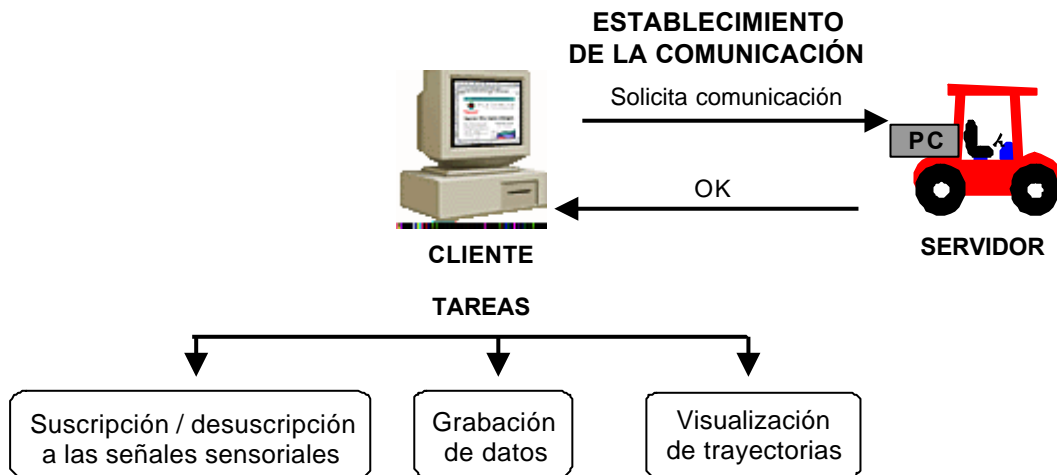


Figura 4.17: Tareas comunes a todo programa CLIENTE de la arquitectura AMARA

Para facilitar el envío de mensajes entre el cliente y el servidor, se ha creado un interfaz o entorno gráfico que, a través de la pulsación de botones, envía automáticamente al servidor los mensajes requeridos: establecimiento de la conexión, suscripción y desuscripción a las señales sensoriales, grabación de datos, visualización, etc. En la figura 4.18 se muestra el entorno de usuario diseñado para el programa CLIENTE. Una explicación detallada del mismo se presenta en el apéndice D.

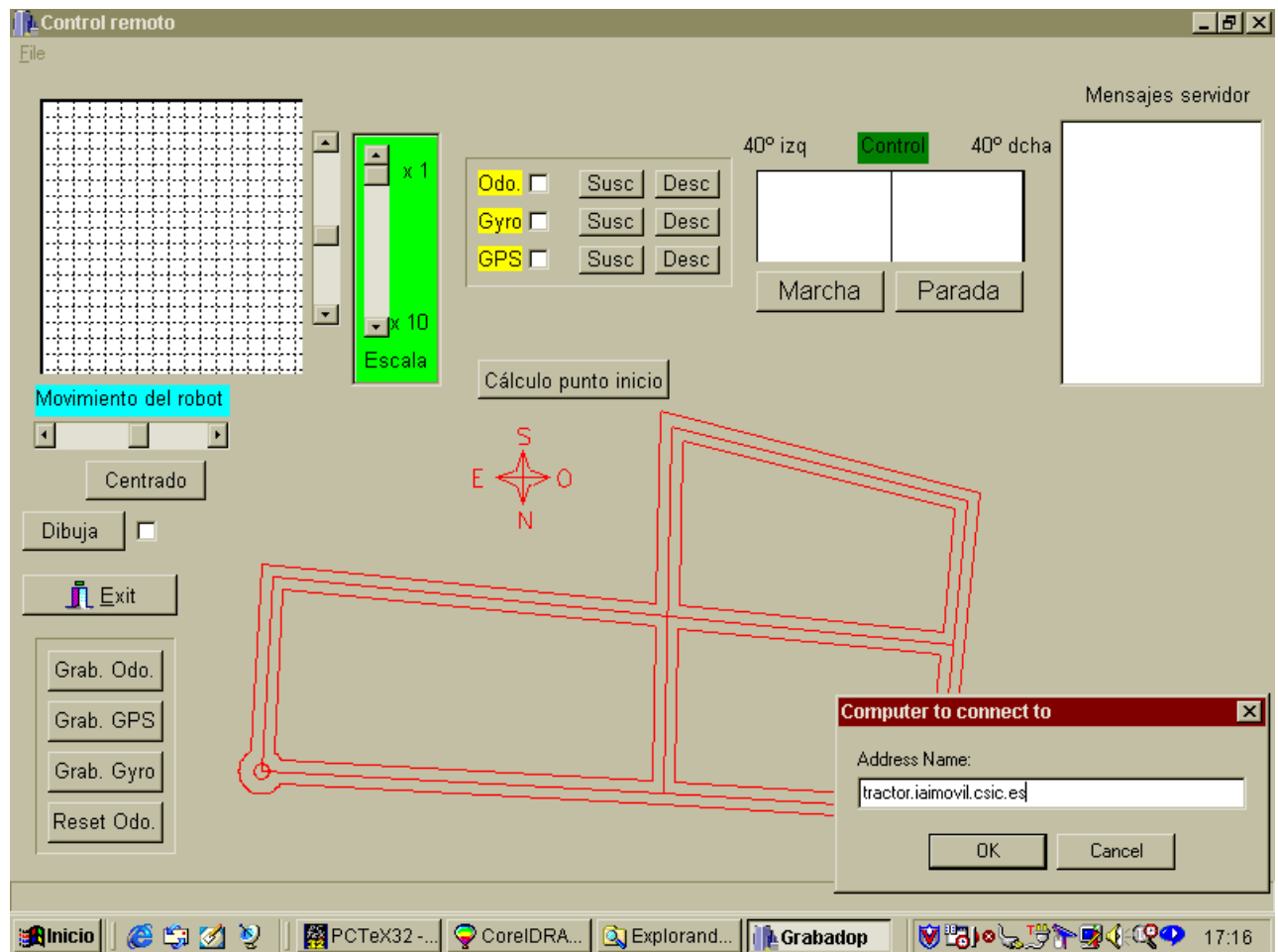


Figura 4.18: Interfaz del programa CLIENTE con el usuario

Partiendo de las características y funciones comunes de todo programa CLIENTE se ha desarrollado en esta tesis un programa CLIENTE específico que engloba dos agentes de comportamiento pertenecientes al nivel medio de la arquitectura AMARA (figura 4.13): agente de comportamiento CONTROL REMOTO y agente de comportamiento VE A PUNTO. Al tratarse de un programa CLIENTE hace uso de los servicios que proporciona el programa SERVER y que se corresponde con el nivel inferior de la arquitectura AMARA. Se presenta a continuación una breve descripción de los mismos.

Control remoto del vehículo

El agente de comportamiento CONTROL REMOTO permite el guiado del vehículo como si de un coche teledirigido se tratase. Emplea, por tanto, órdenes de movimiento básico del vehículo que son enviadas al servidor a través de los mensajes de control del giro del volante y de parada y marcha del vehículo (tabla D.2, apéndice D). Al ser estos últimos mensajes especiales, la tarea de control remoto del vehículo es de carácter exclusivo, esto es, sólo puede ser ejecutada por el

cliente controlador.

Si se desea visualizar la trayectoria seguida por el tractor al navegar de forma remota, el cliente debe solicitar la suscripción a las señales sensoriales de odometría y/o GPS y activar la acción de dibujar pulsando la tecla *Dibuja* (figura 4.18).

El control remoto del vehículo se realiza a través de un *joystick* virtual que consta de una pequeña pantalla, que hace las veces de palanca de mando, para el envío de giros al volante y de dos botones, uno para la orden de puesta en marcha del vehículo y otro para la orden de parada del mismo (figura 4.18). El funcionamiento del agente CONTROL REMOTO se muestra en la figura 4.19 y se describe a continuación.

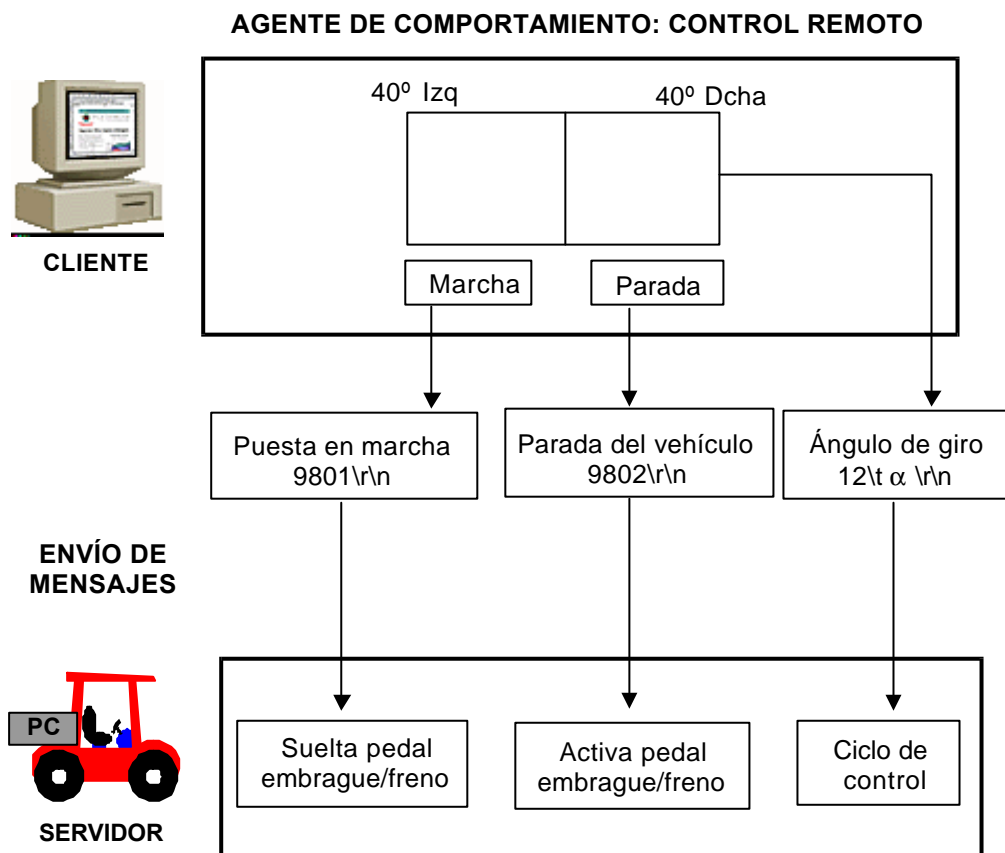


Figura 4.19: Funcionamiento del agente de comportamiento CONTROL REMOTO

Al pulsar el botón de *Parada*, el programa CLIENTE envía automáticamente al servidor el mensaje de detención del vehículo (tabla D.2, apéndice D). SERVER responde activando el pedal del embrague/freno a fondo hasta parar el vehículo. La acción contraria la realiza el botón de *Marcha*. Al presionar este botón, se envía el mensaje de puesta en marcha del vehículo (tabla D.2, apéndice D). El servidor responde soltando el pedal del embrague/freno.

A través de la pantalla o palanca de mandos, el cliente envía las consignas de giro del volante al tractor (tabla D.2, apéndice D). El valor del ángulo de giro que se envía en el mensaje se obtiene

a partir de la posición del ratón sobre la pantalla. Así, al pulsar con el ratón sobre la pantalla o palanca de mandos, el programa CLIENTE convierte esta posición en el valor del ángulo de giro correspondiente α , compone el mensaje de control de giro (tabla D.2, apéndice D) y lo envía al SERVER. El servidor interpreta el mensaje recibido del cliente, poniendo en marcha el ciclo de control del giro del robot, esto es, compara el giro actual del volante del vehículo con el deseado y activa la orden de apertura de las válvulas que gobiernan la dirección del vehículo hasta alcanzar el giro objetivo.

Agente Ve a Punto

El agente de comportamiento VE A PUNTO se sitúa en el nivel medio de la arquitectura AMARA. Mediante esta opción, el *cliente controlador*⁵ puede solicitar al servidor que desplace al robot de forma autónoma a un punto determinado.

Para ello, el panel de control del programa CLIENTE contiene un plano de las pistas del IAI-CSIC, que constituye el entorno de movimiento del tractor (figura 4.18). Las esquinas de estas pistas se encuentran georeferenciadas en coordenadas UTM este y norte. La posición de partida del tractor se obtiene al promediar durante un minuto las posiciones obtenidas del GPS. Para indicar el punto objetivo donde se desea llevar el tractor, el usuario pulsa con el ratón sobre el mapa de las pistas de su panel de control el punto destino deseado.

Una vez conocido el punto de partida o de inicio y el punto destino sobre el mapa de las pistas, se genera una secuencia de órdenes de movimiento, esto es, mensajes de control para la activación de los agentes de comportamiento básicos de marcha/parada del vehículo y de control del giro del volante (tabla D.2, apéndice D) que conduzcan al tractor hasta el punto objetivo. El capítulo 5 de esta memoria dedica la sección 5.6 a la descripción y muestra de resultados experimentales de este agente de comportamiento.

4.5 Modelo cinemático del vehículo

En la sección 4.3 se justificó la necesidad de emplear más de un sensor para posicionar de forma precisa un vehículo en un entorno de exteriores. Se propuso para tal fin el empleo de la odometría del vehículo como sensor interno y de un GPS diferencial como sensor externo.

Los sensores internos permiten el cálculo de la posición y orientación del vehículo de forma relativa. Es decir, a partir de una posición inicial o de partida, miden la distancia viajada por el

⁵Al tratarse de una tarea que incluye movimiento del vehículo, sólo puede ser ejecutada por el *cliente controlador*.

vehículo para obtener la posición final que éste alcanza. Se hace necesario, por tanto, disponer de un modelo cinemático del vehículo que describa el comportamiento del mismo cuando se encuentra en movimiento, lo que permite, tomando como base este modelo matemático, estimar la posición del vehículo a través de los sensores internos.

Un modelo de un sistema físico es una simplificación de la realidad, con el fin de describir propiedades y relaciones esenciales para una determinada aplicación. El grado de detalle con que se han de poner en manifiesto los fenómenos implicados en el sistema varían en función de los objetivos perseguidos con el modelo. Cualquier modelo planteado para el estudio del comportamiento de un móvil no deja de ser una aproximación del comportamiento real del mismo. Su validez está limitada al rango de variables de actuación para las cuales se ha obtenido.

Así, el modelo cinemático de un móvil describe la variación temporal de la posición y orientación sin contemplar la acción de agentes externos y/o internos, esto es, manteniendo constante la velocidad lineal y la velocidad angular del mismo. Puede decirse que el modelo cinemático de un móvil establece la relación existente entre las variables locales (tracción y dirección de las ruedas activas) referidas a un sistema inercial ubicado en el propio robot móvil, y las globales (posición y orientación, velocidad lineal y angular) referidas a un sistema de coordenadas cartesiano fijo y externo.

Se describe en esta sección un modelo cinemático de un vehículo denominado modelo de la bicicleta. En él, el sistema de locomoción está formado por una rueda trasera, que cumple la función de impulsar al vehículo, y por una rueda delantera, que sirve para direccionarlo. Por ello, en el modelo teórico, el control de direccionamiento y de tracción se encuentran desacoplados. Para realizar el control del movimiento de la bicicleta se necesita proporcionar una determinada velocidad v a la rueda trasera y un cierto ángulo de direccionamiento α a la rueda delantera.

Este modelo de la bicicleta, aunque simple, permite representar las características de la mayoría de los vehículos con ruedas. Los sistemas de locomoción que pueden reducirse a este modelo son los siguientes:

- Un triciclo, con la rueda delantera de dirección y dos ruedas traseras de tracción a la misma velocidad [Van del Molen 93] [Larsson 96] [Bonnifait 98].
- Un triciclo convencional, con dirección y tracción en la rueda delantera y las dos ruedas traseras de apoyo [Cox 90] [Högström 94].
- Un vehículo convencional de cuatro ruedas con direccionamiento de Ackerman, esto es, dos ruedas de tracción traseras a la misma velocidad y dos ruedas delanteras que giran al mismo tiempo y con el mismo ángulo [Moravec 80] [Laumond 94].

- Vehículos con tracción diferencial y con una o más ruedas libres de soporte [Hollis 77] [Crowley 89] [Preciado 89] [Reister 93].
- Vehículos con ruedas sincronizadas mediante ejes concéntricos [Holland 85] o cadenas [Fitzpatrick 89] [Shiller 93] [Pedraza 00], para que todas las ruedas posean la misma velocidad y orientación.

En el modelo matemático que se analiza a continuación se han considerado las siguientes suposiciones:

- Las ruedas son rígidas y perfectamente circulares, por tanto, sólo poseen un punto de contacto con el suelo.
- El rozamiento entre las ruedas y el suelo resulta suficiente como para que no se produzcan deslizamientos.
- En un período de control, suficientemente pequeño, el vehículo se desplazará de un punto al siguiente a lo largo de un arco de circunferencia sobre el plano en el que se mueve, de radio infinito si avanza en línea recta.
- El vehículo siempre posee las ruedas colocadas de forma perpendicular al plano.

Debido a que muchas de las aplicaciones de los robots móviles se realizan en el espacio bidimensional, el modelo de la bicicleta se desarrollará en el plano. Así, se definirán en primer lugar los sistemas de referencia asociados al modelo cinemático que se describe: el local al vehículo $S_l = \{O_l, X_l, Y_l\}$, y el global o universal $S_g = \{O_g, X_g, Y_g\}$.

4.5.1 Sistema de coordenadas

Para el sistema de referencia global, su centro O_g se hallará situado en algún punto del plano (figura 4.20).

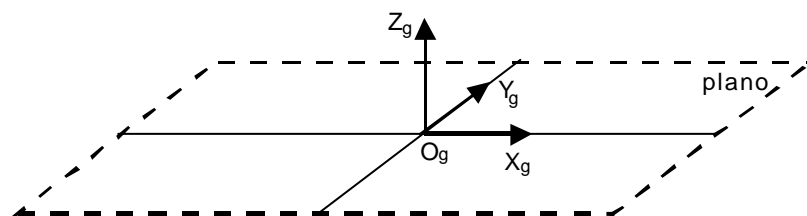


Figura 4.20: Sistema de referencia universal

En lo referente al sistema de referencia local, si se sitúa el centro de referencia O_l en el punto de apoyo de la rueda trasera, el eje Y_l coincide con la línea que une los puntos de apoyo de las

ruedas con el suelo, esto es, el longitudinal, y el eje X_l estará colocado en el eje transversal que pasa por el punto de guía (figura 4.21). El vector Y_l tiene el sentido de la rueda trasera hacia la delantera, y el sentido de X_l se escoge para que el producto vectorial $Z_l = X_l \wedge Y_l$ señale hacia arriba, es decir, que el vector X_l apunte hacia la derecha. La distancia entre los puntos de apoyo de la rueda trasera y delantera se denota como ζ (figura 4.21).

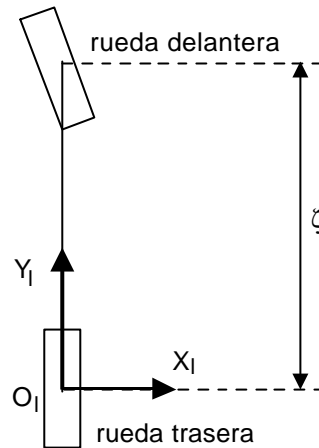


Figura 4.21: Sistema de coordenadas de la bicicleta

Al moverse en el plano, para conocer la posición del vehículo en un determinado instante con respecto al sistema de referencia global S_g , se precisa indicar únicamente las coordenadas (x_g, y_g) para describir la traslación, y el ángulo ϕ para describir la orientación. En el modelo se considerará la orientación como el ángulo que forma el eje Y_l local respecto al eje Y_g global (figura 4.22).

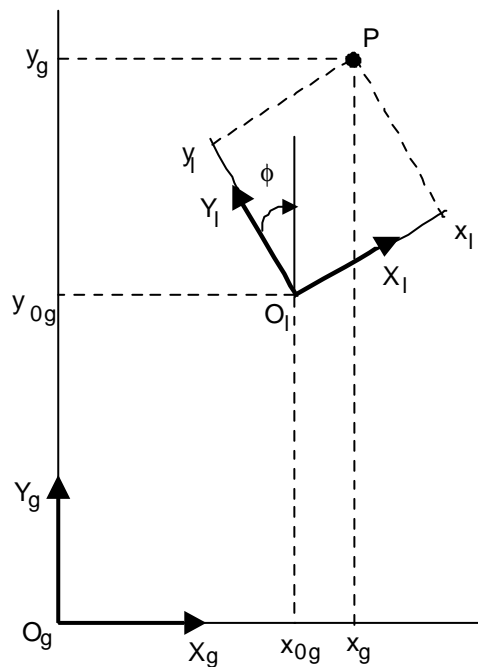


Figura 4.22: Cambio de sistema de referencia

A partir de la figura 4.22, se deducen las ecuaciones que permiten expresar una posición referida al sistema de referencia local en el sistema de referencia global. Si la situación del sistema de referencia local del vehículo es tal que su origen O_l se sitúa en las coordenadas universales (x_{0g}, y_{0g}) y el ángulo entre los ejes Y_l e Y_g es ϕ , las coordenadas locales (x_l, y_l) de un punto P del plano se corresponden con las coordenadas globales (x_g, y_g) resultantes al aplicar primero una rotación ϕ y luego una traslación (x_{0g}, y_{0g}) :

$$x_g = x_{0g} + \cos(\phi)x_l - \sin(\phi)y_l \quad (4.4)$$

$$y_g = y_{0g} + \sin(\phi)x_l + \cos(\phi)y_l \quad (4.5)$$

De igual forma, si se conocen las coordenadas globales de un punto en el plano (x_g, y_g) , las coordenadas de ese mismo punto en el sistema local de referencia del vehículo (x_l, y_l) se calculan de forma inversa, es decir, al aplicar primero una traslación y luego una rotación:

$$x_l = (x_g - x_{0g}) \cos(\phi) + (y_g - y_{0g}) \sin(\phi) \quad (4.6)$$

$$y_l = -(x_g - x_{0g}) \sin(\phi) + (y_g - y_{0g}) \cos(\phi) \quad (4.7)$$

4.5.2 Movimiento de la bicicleta

Una vez obtenida la posición del vehículo cuando se encuentra en reposo, para completar el modelo cinemático, restan deducir las expresiones que definen su estado en movimiento, es decir, la variación de la posición del vehículo en coordenadas globales $(\Delta x_g, \Delta y_g)$.

La figura 4.23 representa el modelo cinemático de la bicicleta. Para intervalos de tiempo Δt pequeños, puede considerarse que el vehículo recorre un arco de circunferencia en el plano, que tendrá radio infinito si se mueve en línea recta.

En la figura 4.23, r representa el radio de giro del centro de referencia local del vehículo, esto es, el radio del arco de circunferencia que describe la rueda trasera. La longitud del arco de circunferencia Δs recorrido por el robot móvil (rueda trasera) en el intervalo de tiempo Δt es igual a la variación de la orientación $\Delta\phi$ del vehículo por el radio r de giro:

$$\Delta s = \Delta\phi r \quad (4.8)$$

Se denomina ángulo de direccionamiento α al ángulo que forma el eje longitudinal del vehículo con la rueda delantera (figura 4.23). Este ángulo puede tomar valores en el intervalo $[-\pi/2, \pi/2]$.

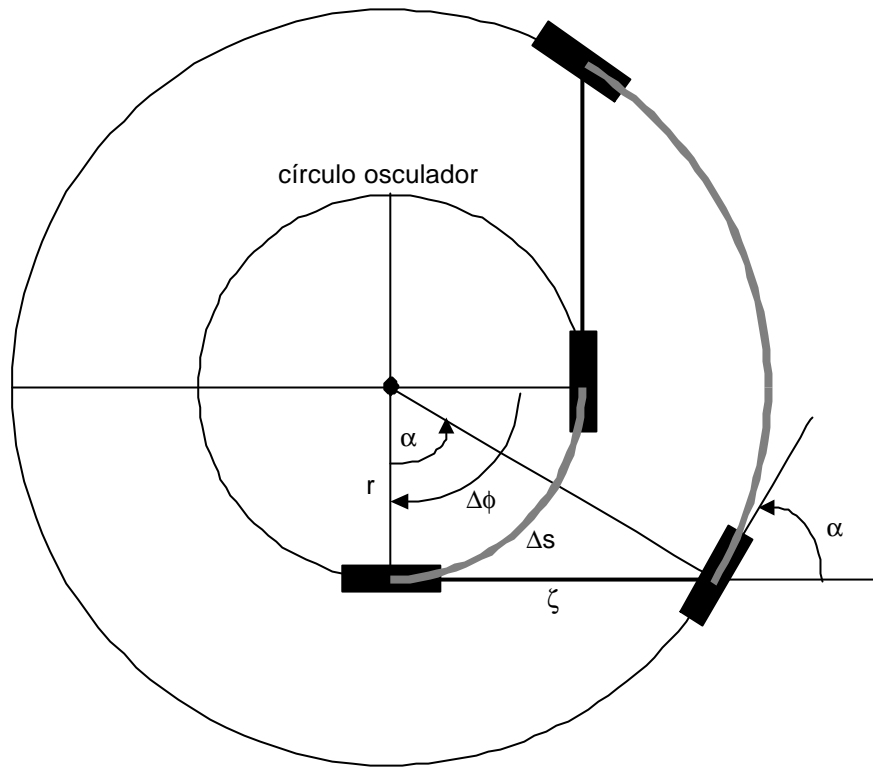


Figura 4.23: Modelo cinemático de la bicicleta

Nótese que, en la ecuación (4.8), para que la distancia Δs que recorre el robot resulte siempre positiva cuando $\Delta\phi$ sea negativo, lo cual ocurre cuando el ángulo α es negativo, r también se debe considerar con signo negativo. La curvatura γ del vehículo se define como la inversa del radio de giro con signo [Barsky 87]:

$$\gamma = \frac{1}{r} \quad (4.9)$$

o bien, si se aplica la ecuación (4.8) a (4.9), puede definirse también la curvatura como la variación de la orientación $\Delta\phi$ del vehículo respecto a la distancia Δs que éste recorre:

$$\gamma = \frac{\Delta\phi}{\Delta s} \quad (4.10)$$

Se denomina círculo osculador a la circunferencia que describiría el móvil si mantuviese constante su curvatura, es decir, si no modificase su ángulo de direccionamiento. El centro del círculo osculador es el centro de curvatura y se halla contenido en el eje X_l local de la bicicleta (figura 4.23). La curvatura proporciona una medida de cómo el vehículo modifica su orientación, es decir, de cómo se separa del comportamiento rectilíneo.

Según la figura 4.23, la tangente del ángulo de direccionamiento α se calcula como el cociente entre la distancia ζ de los puntos de apoyo de las ruedas trasera y delantera y el radio de giro r

del centro de referencia local del vehículo:

$$\tan(\alpha) = \frac{\zeta}{r} \quad (4.11)$$

Introduciendo la ecuación (4.9) en la expresión dada por (4.11), se obtiene que el ángulo de direccionamiento α sólo depende de la curvatura γ deseada:

$$\alpha = \arctan(\zeta \cdot \gamma) \quad (4.12)$$

Una vez definido el radio de giro y la curvatura del vehículo, se calcula ahora la variación en coordenadas locales de la posición del vehículo en el eje X (Δx_l) y en el eje Y (Δy_l). Así, de la figura 4.24:

$$\cos(-\Delta\phi) = \frac{(-r) - \Delta x_l}{(-r)} \quad (4.13)$$

$$\sin(-\Delta\phi) = \frac{\Delta y_l}{(-r)} \quad (4.14)$$

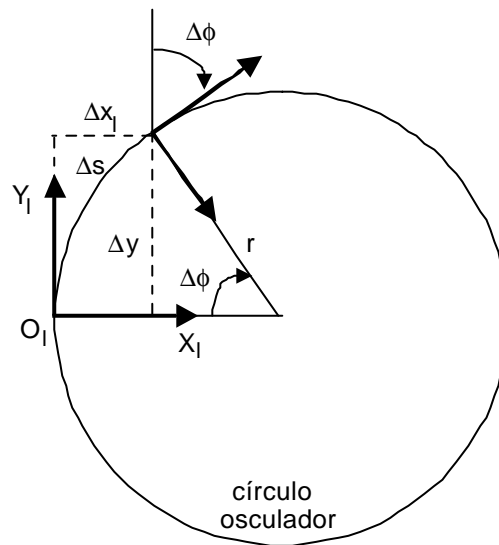


Figura 4.24: Variación de la posición en coordenadas locales

Si se aplica la expresión (4.9) a las ecuaciones (4.13) y (4.14), se obtiene la variación de la posición del vehículo en coordenadas locales en función de la curvatura:

$$\Delta x_l = \frac{\cos(\Delta\phi) - 1}{\gamma} \quad (4.15)$$

$$\Delta y_l = \frac{\sin(\Delta\phi)}{\gamma} \quad (4.16)$$

Si la curvatura es nula (radio de curvatura infinito), las expresiones (4.15) y (4.16) no pueden aplicarse. En este caso, el vehículo se desplaza en línea recta (figura 4.25), por lo que:

$$\Delta x_l = 0 \quad (4.17)$$

$$\Delta y_l = \Delta s \quad (4.18)$$

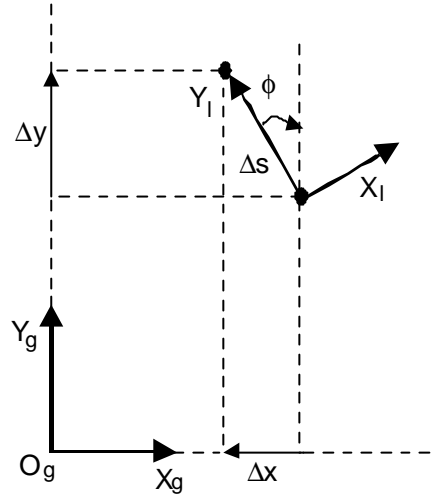


Figura 4.25: Desplazamiento del vehículo

Para obtener la variación en coordenadas globales de la posición del vehículo en el eje X_g (Δx_g) y en el eje Y_g (Δy_g), se aplican las ecuaciones (4.4) y (4.5) de cambio de sistema de referencia a las expresiones (4.15) y (4.16):

$$\Delta x_g = \frac{\cos(\phi) (\cos(\Delta\phi) - 1) - \sin(\phi) \sin(\Delta\phi)}{\gamma} \quad (4.19)$$

$$\Delta y_g = \frac{\sin(\phi) (\cos(\Delta\phi) - 1) + \cos(\phi) \sin(\Delta\phi)}{\gamma} \quad (4.20)$$

Si la curvatura vale cero, Δx_g e Δy_g se calculan aplicando las ecuaciones dadas por (4.4) y (4.5) a las expresiones definidas en (4.17) y (4.18), obteniéndose:

$$\Delta x_g = -\sin(\phi) \Delta s \quad (4.21)$$

$$\Delta y_g = \cos(\phi) \Delta s \quad (4.22)$$

Estas ecuaciones no sólo se utilizan cuando la curvatura del vehículo vale cero, sino que (4.19) y (4.20) tienden a (4.21) y (4.22) cuando $\Delta\phi$ tiende a cero (figura 4.25). Esto ocurre cuando

la curvatura del vehículo es reducida o cuando el espacio recorrido Δs resulta pequeño, ya sea porque la velocidad v del vehículo es escasa o porque los cálculos se realizan a intervalos cortos de tiempo Δt . De las ecuaciones anteriores se deduce además que:

$$\phi = \arctan\left(\frac{-\Delta x_g}{\Delta y_g}\right) \quad (4.23)$$

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x_g^2 + \Delta y_g^2} \quad (4.24)$$

La velocidad instantánea v del centro de referencia del vehículo se define como el incremento del espacio recorrido Δs respecto al tiempo Δt que tarda en recorrerlo:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (4.25)$$

donde aplicando la ecuación (4.8):

$$v = \frac{r \Delta \phi}{\Delta t} \quad (4.26)$$

Por último, cabe indicar que son dos las ventajas de situar el centro de referencia de la bicicleta en el punto de apoyo de la rueda trasera. La primera de ellas es que la orientación del vehículo se alinea con la tangente del camino que sigue. Esta es precisamente la posición óptima para colocar una cámara o un sensor láser en la parte delantera del vehículo [Martínez 98]. La segunda ventaja es que el control de la velocidad y curvatura del vehículo se puede realizar de forma independiente.

4.5.3 Aplicación del modelo de la bicicleta al robot ROJO

Si se considera que el controlador del robot móvil opera en términos de un vehículo virtual para poder adaptarse a diferentes formas de locomoción, el robot móvil ROJO puede representarse mediante el modelo cinemático de la bicicleta. El controlador de bajo nivel se encargará de trasladar las órdenes de velocidad lineal y curvatura (o velocidad angular) para el vehículo virtual a consignas apropiadas al sistema de control específico del robot móvil.

El número de grados de libertad de un robot móvil se define como el número de coordenadas utilizadas para posicionar el vehículo respecto de los ejes universales, menos el número de ecuaciones independientes que las relacionan. Como en el modelo cinemático de la bicicleta descrito el vector de coordenadas posee tres componentes (x, y, ϕ) , que se encuentran relacionadas entre sí por la ecuación (4.23), dicho modelo será aplicable a robots móviles con dos grados de libertad.

Se presenta a continuación la aplicación del modelo cinemático de la bicicleta descrito al robot ROJO.

Para aplicar el modelo de la bicicleta al robot ROJO, el centro de referencia del vehículo O_l se ha escogido en el centro del eje de las ruedas traseras. El eje X_l se halla colocado sobre el eje de las ruedas traseras y apunta hacia la rueda derecha. El eje Y_l se ubica sobre el eje longitudinal del vehículo y apunta hacia el frente. La mitad de la distancia entre los puntos medios de las ruedas traseras, K , vale 0.67 m (figura 4.26).

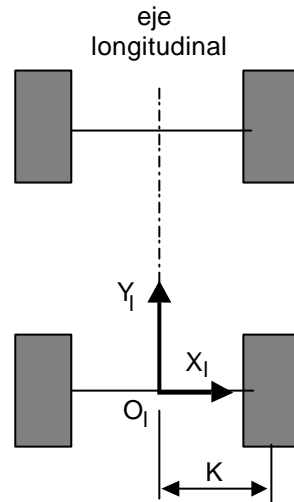


Figura 4.26: Sistema local de coordenadas del robot ROJO

El direccionamiento diferencial se realiza mediante la orden de ejecución de una velocidad a cada una de las ruedas traseras en cada periodo de control Δt . Así, la velocidad lineal v y la curvatura γ deseadas en el movimiento del vehículo ordenadas a su centro de referencia, definirán la velocidad de avance de la rueda trasera izquierda v_i y de la rueda trasera derecha v_d .

La figura 4.27 representa el direccionamiento diferencial en el robot ROJO. Como se observa en la figura 4.27, el radio de giro para la rueda trasera izquierda vale $(r - K)$ y para la rueda trasera derecha vale $(r + K)$, donde r es el radio de giro de la curvatura ordenada al centro de referencia del vehículo. Así, por la ecuación (4.8), las longitudes del arco de circunferencia recorridos por la rueda izquierda, Δs_i , y derecha, Δs_d , valen:

$$\Delta s_i = \Delta\phi(r - K) \quad (4.27)$$

$$\Delta s_d = \Delta\phi(r + K) \quad (4.28)$$

siendo $\Delta\phi$ la variación de la orientación del vehículo.

La velocidad de la rueda trasera izquierda v_i y derecha v_d se obtienen como el cociente del

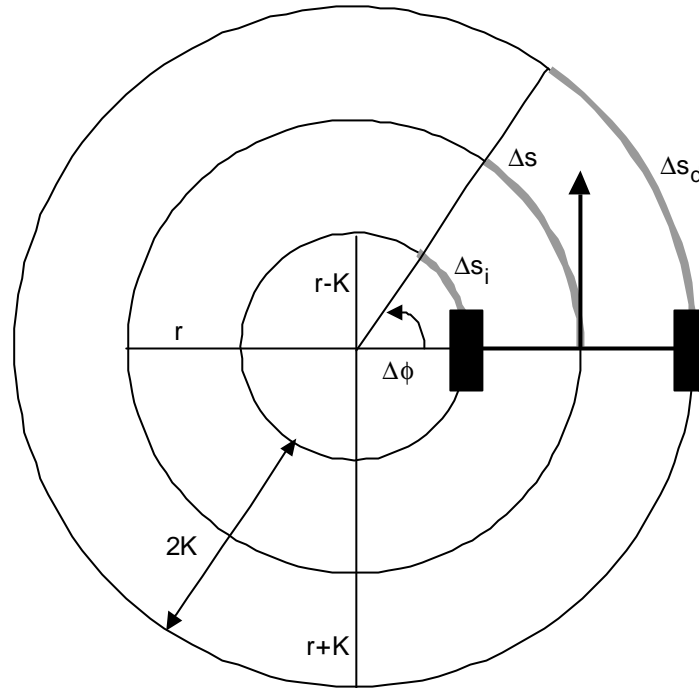


Figura 4.27: Direccionamiento diferencial

espacio recorrido por cada una de ellas, ecuaciones (4.27) y (4.28), en el incremento de tiempo Δt .

$$v_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t} = \frac{\Delta \phi (r - K)}{\Delta t} \quad (4.29)$$

$$v_d = \frac{\Delta s_d}{\Delta t} = \frac{\Delta \phi (r + K)}{\Delta t} \quad (4.30)$$

Para expresar estas velocidades en función de la velocidad lineal v y la curvatura γ ordenadas al centro de coordenadas del vehículo, basta considerar que $\Delta \phi = \gamma \Delta s$ y $r = 1/\gamma$, esto es:

$$v_i = \frac{\Delta s \gamma \left(\frac{1}{\gamma} - K \right)}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} - \frac{\Delta s}{\Delta t} \gamma K = v (1 - \gamma K) \quad (4.31)$$

$$v_d = \frac{\Delta s \gamma \left(\frac{1}{\gamma} + K \right)}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} + \frac{\Delta s}{\Delta t} \gamma K = v (1 + \gamma K) \quad (4.32)$$

Una vez definida la velocidad lineal de cada rueda, la velocidad lineal v y angular ω ordenadas al centro de coordenadas del vehículo se obtienen al sumar (4.31) y (4.32) y al restar (4.32) a (4.31), respectivamente:

$$v = \frac{v_i + v_d}{2} \quad (4.33)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_i}{2K} \quad (4.34)$$

Conocido el modelo cinemático del vehículo, se procede ahora a obtener las estimaciones de la posición del robot ROJO a partir de los sensores internos incorporados. Mediante los odómetros se obtiene el espacio recorrido por las ruedas y la orientación del robot, pudiéndose determinar la velocidad de cada rueda a partir de esta distancia estimada.

Sean $\Delta\hat{s}_d(t)$ y $\Delta\hat{s}_i(t)$ las distancias recorridas por las ruedas derecha e izquierda, estimadas en un instante t a partir de los odómetros al multiplicar el número de imanes que detecta cada sensor de efecto hall por la distancia entre imanes, esto es, el perímetro de cada rueda dividido entre 32. A partir de estas medidas, puede estimarse el incremento de la distancia $\Delta\hat{s}$ del centro de referencia del vehículo al sustituir las ecuaciones (4.29) y (4.30) en valores estimados en la expresión (4.33):

$$\Delta\hat{s}(t) = \frac{\Delta\hat{s}_d(t) + \Delta\hat{s}_i(t)}{2} \quad (4.35)$$

Una vez estimada la distancia recorrida por el vehículo, la estimación de la velocidad lineal del tractor $\hat{v}(t)$ viene dada al aplicar (4.35) a la expresión (4.25):

$$\hat{v}(t) = \frac{\Delta\hat{s}(t)}{\Delta t} \quad (4.36)$$

La estimación en cada instante de la variación de la orientación del vehículo $\Delta\hat{\phi}(t)$ a partir de los odómetros, se obtiene de la ecuación (4.34) en valores estimados:

$$\hat{\omega}(t) = \frac{\Delta\hat{\phi}(t)}{\Delta t} = \frac{\hat{v}_d(t) - \hat{v}_i(t)}{2K} \quad (4.37)$$

donde sustituyendo las expresiones (4.30) y (4.29) en valores estimados y despaajando $\Delta\hat{\phi}(t)$ se obtiene que:

$$\Delta\hat{\phi}(t) = \frac{\Delta\hat{s}_d(t) - \Delta\hat{s}_i(t)}{2K} \quad (4.38)$$

Por tanto, la posición relativa del centro del vehículo respecto al sistema de referencia global estimada a partir de los sensores odométricos es:

$$\hat{x}(t) = \hat{x}(t-1) - \Delta\hat{s}(t) \sin \hat{\phi}(t) \quad (4.39)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{y}(t-1) + \Delta\hat{s}(t) \cos \hat{\phi}(t) \quad (4.40)$$

y la estimación de la orientación total del vehículo en cada instante, $\hat{\phi}(t)$, se obtiene al sumar a la estimación del incremento de orientación $\Delta\hat{\phi}(t)$, ecuación (4.38), la estimación de la orientación en el instante anterior $\hat{\phi}(t-1)$:

$$\hat{\phi}(t) = \Delta\hat{\phi}(t) + \hat{\phi}(t-1) \quad (4.41)$$

Conocida la estimación de la variación de la orientación del vehículo, la estimación de la curvatura $\hat{\gamma}$ viene dada por la expresión (4.10):

$$\hat{\gamma} = \frac{\Delta\hat{\phi}}{\Delta\hat{s}} \quad (4.42)$$

Conocida la curvatura, el ángulo de giro α que debe ordenarse a las ruedas delanteras viene dado por la ecuación (4.12):

$$\alpha = \arctan(\zeta \cdot \hat{\gamma}) \quad (4.43)$$

4.6 Recapitulación

La automatización de un vehículo comprende la integración de tecnologías procedentes de muy distintas áreas de conocimiento: mecánica, electrónica, programación, arquitectura de ordenadores, control, etc. Así, la adaptación de vehículos convencionales que permitan realizar una determinada tarea de forma autónoma requiere un importante esfuerzo temporal y humano. Este esfuerzo representa el deseo de convertir en útiles las teorías desarrolladas y probadas en los laboratorios.

Este capítulo describe de forma detallada el robot tractor ROJO, plataforma o sistema de experimentación desarrollada íntegramente en el IAI-CSIC para la resolución del problema del posicionamiento preciso en exteriores sobre el que se centra este trabajo de tesis doctoral.

Se presenta la elección y puesta en funcionamiento de los actuadores para el control del movimiento básico del tractor, esto es, las órdenes de *avanza* y *gira*. El sistema de control del movimiento básico fundamenta todas las estrategias de navegación de niveles superiores. Esta automatización consta de dos controladores: uno borroso, para el gobierno del giro del volante, y otro *todo/nada*, para el control del pedal del embrague, esto es, para el control de la parada y puesta en marcha del robot. Además, se contempla la detección y control de errores e imprevistos en estos niveles más bajos del proceso a fin de evitar su propagación hacia niveles superiores.

Se describe el sistema sensorial a bordo del robot tractor para el conocimiento de la posición en la que éste se encuentra en cada momento. Entre la amplia gama de posibilidades, se han elegido aquellos sensores que, aún siendo de bajo coste, son robustos frente a condiciones de dureza o variabilidad en el entorno (cambios de luminosidad, polvo, vibraciones, etc.) y además poseen un bajo consumo, un volumen/peso reducido y bajo coste, factores importantes si se desea una salida comercial del tractor.

El sistema sensorial de posicionamiento incorporado a bordo del tractor consta de un odómetro en cada una de las ruedas para estimar la distancia viajada por el vehículo y su orientación, formado por sensores de efecto hall y 32 imanes dispuestos radialmente en la cara interna de las ruedas traseras, y de un receptor GPS de precisión submétrica recibiendo correcciones diferenciales a través de un satélite geoestacionario.

En lo referente a la estructura de proceso diseñada para el robot ROJO, ésta se basa en una arquitectura cliente-servidor. Como características principales de la arquitectura de proceso empleada caben destacar las siguientes:

- Modularidad, que evita repetir tareas comunes a diferentes procesos.
- Flexibilidad, permitiendo incorporar nuevas funciones según las necesidades requeridas para la tarea.
- Especialización del servidor y de los clientes en una tarea determinada. Así, el control de bajo nivel del tractor recae sobre el servidor. Los clientes utilizan este servicio para realizar las tareas específicas para las que han sido diseñados.
- Visualización y control desde cualquier ordenador externo, aprovechando la gran flexibilidad de la red inalámbrica y la estructura de la red local del IAI-CSIC.

Se ha diseñado un conjunto de mensajes que permite la comunicación entre el servidor y los clientes a él conectados.

Capítulo 5

Localización precisa en exteriores

5.1 Introducción

En el capítulo 2 de esta tesis se justificó la necesidad de emplear más de un sensor para posicionar de forma continua, precisa y en tiempo real un vehículo en exteriores. Así, en el capítulo 4 se propuso un sistema sensorial que, empleando el mínimo número de sensores posibles, en concreto un odómetro como sensor interno y un receptor GPS diferencial como sensor externo, permita cumplir los requisitos de precisión, disponibilidad y robustez exigidos en todo sistema de posicionamiento.

Los sensores internos obtienen la posición y orientación del vehículo de forma relativa. Es decir, a partir de una posición inicial miden la distancia viajada por el vehículo para obtener la posición final que éste alcanza.

El posicionamiento relativo ocasiona un aumento de la incertidumbre en la estimación de la posición con la distancia viajada por el vehículo, empleándose el GPS para acotar y corregir este error. Esto es, se combina la información que acerca de la posición proporcionan en un mismo instante los sensores a bordo del vehículo para obtener la mejor estimación de la posición en la que éste se encuentra, así como el grado de confianza que en cada periodo de muestreo posee la posición estimada por el conjunto de sensores a bordo del robot. Son varias las técnicas de fusión sensorial encontradas en la literatura, entre ellas caben destacar las basadas en métodos probabilísticos [Grover 97], en lógica borrosa [Beom 95], en algoritmos de comportamientos [Arkin 98] o en redes neuronales [Zalzala 96].

En métodos probabilísticos, para realizar la fusión de la información proporcionada por los diferentes sensores a bordo del robot, debe tenerse en cuenta la naturaleza de los errores que afectan a las medidas de los sensores. En ocasiones, los errores asociados a las medidas no se encuentran correlacionados consigo mismos. Se dice así que las medidas están contaminadas con

ruido blanco. Esta circunstancia ideal simplifica notablemente el proceso de fusión.

En otros casos, el error en la medida aportada por uno de los sensores puede encontrarse autocorrelacionada, esto es, que exista una correlación en el tiempo entre el error en un instante y componentes anteriores de la secuencia. Este tipo de error autocorrelacionado se denomina ruido coloreado. En estos casos, para llevar a cabo la fusión sensorial se separa en el error la componente coloreada o autocorrelacionada de la no correlacionada o blanca [Chui 90].

Independientemente de que el error en las estimaciones realizadas por los sensores a bordo del robot se encuentren o no correlacionadas, esto es, estén afectadas por ruido coloreado o por ruido blanco, puede ocurrir que el error en la información proporcionada por estos sensores posea componentes comunes, esto es, que se encuentren correlacionados entre sí aunque las medidas hayan sido obtenidas con sensores diferentes. Esta última circunstancia puede deberse, por ejemplo, a vibraciones del propio vehículo que originan errores comunes en los sensores a bordo del mismo.

Este capítulo está dedicado al estudio de la localización y análisis de la incertidumbre asociada a la estimación de la posición en el plano para un vehículo en un entorno de exteriores cuyo sistema sensorial consiste en un sensor interno, basado en la odometría del vehículo, y en un sensor externo, un GPS diferencial. La estructura del capítulo es la siguiente. En primer lugar, se describe el modelo de las transformaciones aproximadas para la representación de la incertidumbre en la posición. Las transformaciones aproximadas permiten representar la localización de un objeto respecto a otro, junto a la incertidumbre asociada a esta localización, lo que la hace adecuada para la representación de posiciones relativas como son las obtenidas por los odómetros. A continuación, se desarrollan los algoritmos probabilísticos para la fusión de la información que sobre la posición obtiene un conjunto cualesquiera de sensores a bordo de un robot, atendiendo a la naturaleza del error asociado a cada uno de ellos. Este algoritmo puede extenderse a cualquier otro tipo de información distinta de la posición que se desee fusionar, previo conocimiento del carácter del error que lleven asociado. Seguidamente se estudia, para el sistema sensorial particular a bordo del robot ROJO (odometría y GPS diferencial), la naturaleza del error asociado a cada uno de los sensores que lo componen. Con esta información, se particulariza el algoritmo de fusión al sistema sensorial propio del robot ROJO, lo que permite obtener la mejor estimación de la posición del vehículo y la incertidumbre asociada a esta estimación conjunta como indicador de la fiabilidad de la posición estimada. A continuación se valida experimentalmente el algoritmo de fusión propuesto sobre el tractor ROJO mediante el desarrollo del agente de comportamiento VE A PUNTO perteneciente al nivel medio de la arquitectura AMARA. Se presentan, finalmente, las conclusiones obtenidas.

5.2 Estimación de la incertidumbre espacial

En muchas aplicaciones, una información importante que maneja el controlador de un robot móvil es el conocimiento de la posición en que se encuentra en cada momento respecto a un sistema de referencia global. De su precisión depende, en gran medida, la funcionalidad del robot y el éxito de la tarea.

La estimación más simple de la posición del vehículo se lleva a cabo mediante sensores internos odométricos y de navegación inercial, que miden el comportamiento del robot móvil a intervalos regulares de tiempo. Sin embargo, debido al carácter relativo de estos sensores, a medida que aumenta la distancia recorrida por el vehículo, la estimación realizada empeora. Esto es, la acumulación de errores durante la navegación provoca que la región de incertidumbre asociada a la estimación de la posición se haga cada vez mayor. El empleo de sensores externos o sensores absolutos permite corregir la posición del vehículo, logrando así una estimación más exacta de la posición del robot, aunque requiere un mayor tiempo de procesamiento. Esta circunstancia, sin embargo, no es restrictiva si el vehículo se mueve a una velocidad pequeña.

Se deduce, por tanto, la necesidad de conocer el grado de confianza que en cada periodo de muestreo posee la posición estimada por el conjunto de sensores a bordo del robot.

Son varios los métodos propuestos en la literatura para cuantificar la incertidumbre asociada al movimiento de vehículos autónomos. Así, Chatila y Laumond [Chatila 85] utilizaron un escalar estimado como medida de la incertidumbre de la posición, sin hacer referencia al error en la orientación. Brooks limita los errores de posición mediante cotas máximas y mínimas, que varían en cada sistema de referencia local asociado al vehículo [Brooks 85]. Este método, sin embargo, resulta inadecuado debido a la acumulación de errores en las sucesivas estimaciones realizadas, lo que origina un considerable aumento en el valor de las cotas a medida que el vehículo se mueve. Además, las cotas se obtienen tras sucesivos experimentos que informan del mayor error cometido al posicionar el vehículo, sin asegurar si dicho error responde a la estimación más deficiente.

Smith y Cheeseman [Smith 86], al igual que Brooks, emplean sistemas de referencia locales al vehículo, con la diferencia de que sí estiman el aumento de la incertidumbre con el movimiento del robot. Esta incertidumbre viene cuantificada por la matriz de covarianza. Pero en la mayoría de los casos, el cálculo de la matriz de covarianza no es directo, debido a la naturaleza no lineal del estimador. Smith y Cheeseman emplearon los dos primeros términos del desarrollo de Taylor para evaluar la incertidumbre asociada a la matriz de covarianza, lo cual resulta simple de computar y generalizar, además de favorecer el cálculo en tiempo real. Minuciosos experimentos que establecen una comparación entre el estimador de primer orden frente a otros de orden

superior, han demostrado la eficacia de la técnica propuesta [Wang 88].

A continuación se describe la técnica de las transformaciones aproximadas como herramienta matemática para el modelado y propagación de la incertidumbre en el plano.

5.2.1 Transformación aproximada

La técnica de las transformaciones aproximadas permite obtener la relación entre sistemas de coordenadas que representan las localizaciones relativas de objetos y la incertidumbre asociada a esta relación. Así, una transformación aproximada $T = \{\hat{Loc}, Cov\}$ se define como una posición estimada $\hat{Loc} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{\phi})^T$ de un sistema de referencia respecto a otro, junto a la matriz de covarianza Cov que representa la incertidumbre asociada a la estimación.

La transformación aproximada se representa geoméricamente por una flecha que une los orígenes de los dos sistemas de referencia con dirección a la posición resultante (figura 5.1). En esta figura, la zona sombreada corresponde a la región del plano en la que es más probable localizar al vehículo, esto es, la región de incertidumbre. El centro de dicha región se corresponde con la posición media o estimada.

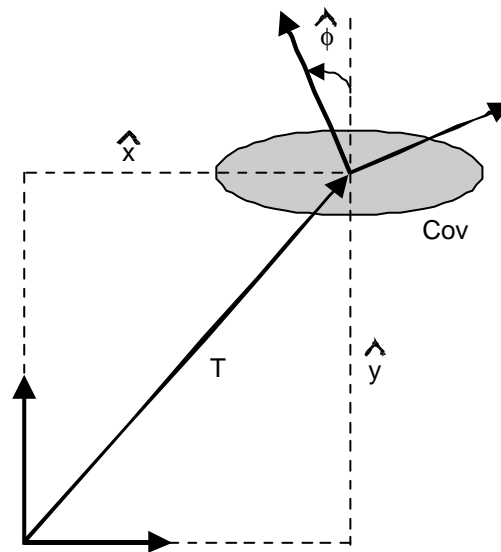


Figura 5.1: Transformación aproximada

Así, la posición real de un sistema de referencia con respecto a otro se considera una variable aleatoria $Loc = (x, y, \phi)^T$ con un valor medio o estimado $\hat{Loc} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{\phi})^T$ y con un determinado contorno de probabilidad definido por la matriz de covarianza Cov . Es decir, con esta técnica, la posición de un robot móvil se puede expresar de la siguiente forma:

$$Loc = \hat{Loc} + e \quad (5.1)$$

donde $e = (x - \hat{x}, y - \hat{y}, \phi - \hat{\phi})^T$ representa al error, variable aleatoria de media cero.

La matriz de covarianza, matriz simétrica y definida positiva, se define como la esperanza matemática de los errores al cuadrado:

$$Cov = E[e e^T] = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \rho_{x\phi}\sigma_x\sigma_\phi \\ \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 & \rho_{y\phi}\sigma_y\sigma_\phi \\ \rho_{x\phi}\sigma_x\sigma_\phi & \rho_{y\phi}\sigma_y\sigma_\phi & \sigma_\phi^2 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

siendo la diagonal principal de esta matriz la varianza, esto es, la medida de la dispersión de los componentes de la variable respecto de la media, y los términos fuera de la diagonal principal las covarianzas entre dos componentes de la variable, definidas como el producto del coeficiente de correlación $\rho = (\rho_{xy}, \rho_{x\phi}, \rho_{y\phi})$ entre cada par de componentes de la variable por sus desviaciones típicas.

A partir de la expresión de una transformación aproximada $T = \{\hat{Loc}, Cov\}$ se puede representar de forma gráfica el área de la incertidumbre asociada cuyo contorno viene definido por la matriz de covarianza Cov . Al ser tres (x, y, ϕ) las componentes de la posición de un objeto en el plano, el contorno dentro del cual la probabilidad de encontrar la posición y orientación del robot móvil toma un determinado valor formará una figura tridimensional. Sin embargo, para decidir cuándo el área de incertidumbre alcanza niveles peligrosos basta, por lo general, con representar el error en coordenadas (x, y) en el plano sobre el cual se mueve el vehículo. La forma de la región de incertidumbre dependerá de la función de distribución de probabilidad que sigan los errores. En caso de seguir una distribución normal¹ su expresión viene dada por:

$$P(Loc) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} x - \hat{x} & y - \hat{y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y \\ \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x - \hat{x} \\ y - \hat{y} \end{pmatrix} \right)}}{2\pi \sqrt{\left| \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y \\ \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \right|}} \quad (5.3)$$

Al considerar la variable de posición bidimensional, la función de distribución normal tiene forma de campana (figura 5.2), por lo que al cortarla con planos paralelos al $X - Y$ se obtienen las curvas de nivel o regiones de igual probabilidad (figura 5.2). Estas curvas son elipses, de ecuación:

$$\begin{pmatrix} x - \hat{x} & y - \hat{y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y \\ \rho_{xy}\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x - \hat{x} \\ y - \hat{y} \end{pmatrix} =$$

¹Esta suposición es bastante acertada en la mayoría de los procesos, como se justificará en el apartado 5.3.

$$\left[\left(\frac{x - \hat{x}}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y - \hat{y}}{\sigma_y} \right)^2 - 2\rho_{xy} \left(\frac{x - \hat{x}}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y - \hat{y}}{\sigma_y} \right) \right] \frac{1}{1 - \rho_{xy}^2} = cte \quad (5.4)$$

Como muestra la figura 5.2, esta elipse de incertidumbre en la posición, cuyo contorno viene determinado por los términos del menor formado por las dos primeras filas y columnas de la matriz de covarianza Cov , ecuación (5.2), se encuentra centrada en la mejor estimación de la posición o valor medio (\hat{x}, \hat{y}) y su orientación viene dada por el coeficiente de correlación ρ_{xy} . Nótese que cuando las componentes (x, y) no están correlacionadas $\rho_{xy} = 0$, y la elipse de incertidumbre tiene la ecuación:

$$\left(\frac{x - \hat{x}}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y - \hat{y}}{\sigma_y} \right)^2 = cte \quad (5.5)$$

esto es, se encuentra alineada con los ejes X e Y de referencia.

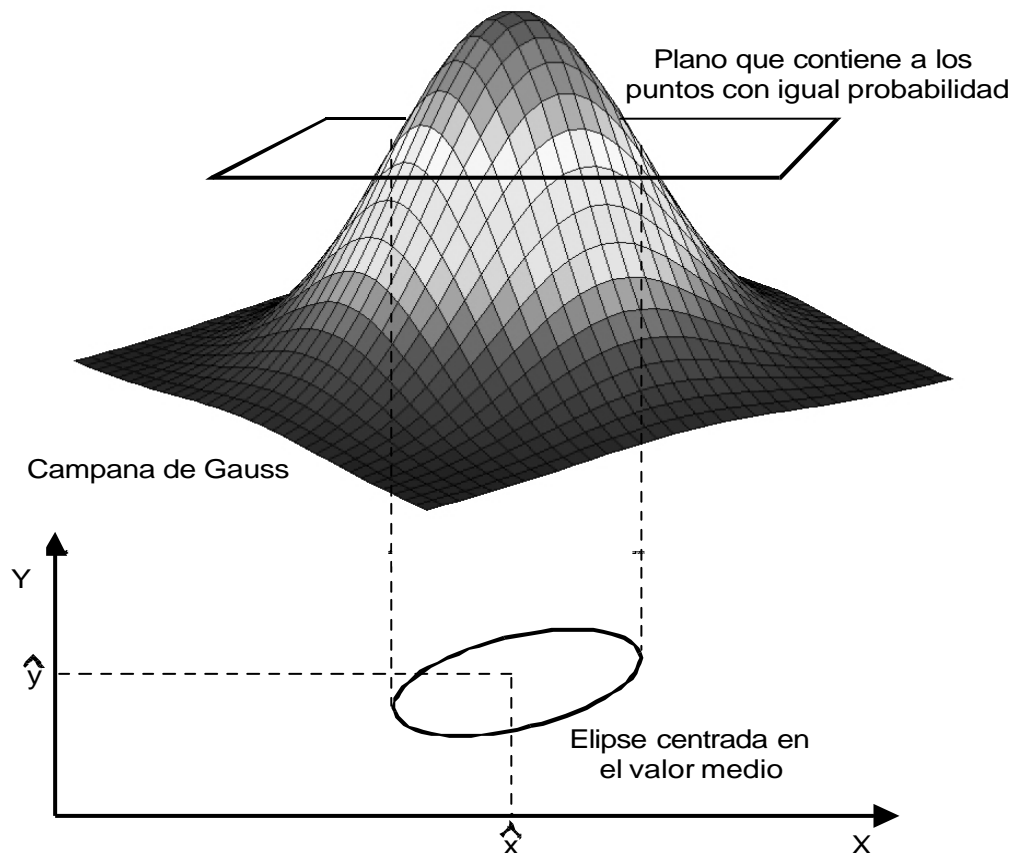


Figura 5.2: Función de probabilidad normal bidimensional y curva de nivel

5.3 Fusión de medidas sensoriales

Para cumplir con los requisitos de continuidad, disponibilidad y robustez necesarios en todo sistema de posicionamiento, se requiere combinar o fusionar la información que sobre la posición ofrecen los diferentes sensores a bordo del vehículo. Así, con el término fusión se hace referencia a la reducción de la incertidumbre en la posición cuando se disponen, en un mismo instante, de dos o más estimaciones de una posición obtenida cada una de ellas por un sensor diferente en un mismo instante t .

En métodos probabilísticos, la localización autónoma de un vehículo se plantea como un problema de estimación de la posición a través de un proceso de fusión basado en probabilidades, partiendo de las estimaciones con incertidumbre que acerca de la localización proporcionan los sensores a bordo del robot. La fusión de estimaciones sensoriales de posición permitirá encontrar la mejor estimación de la posición $\hat{Loc}_f(t) = (\hat{x}_f(t), \hat{y}_f(t), \hat{\phi}_f(t))^T$ y su incertidumbre asociada $Cov_f(t)$, esto es, la transformación aproximada $T_f = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$, a través del análisis de la incertidumbre asociada a las medidas de partida.

Con objeto de dar generalidad y flexibilidad al modelo de fusión que a continuación se detalla, no se particulariza en principio a ningún sistema sensorial específico. Al contrario, a lo largo del desarrollo se hablará de la posición estimada por un *sensor 1* y un *sensor 2* a bordo del robot expresadas en coordenadas globales², de forma que puedan exponerse diferentes estrategias de combinación sensorial en función del ruido o error que puede llevar asociado las medidas obtenidas por los distintos sensores.

Así, dadas dos transformaciones aproximadas:

$$T_{1g}(t) = \{\hat{Loc}_{1g}(t), Cov_{1g}(t)\} \quad (5.6)$$

$$T_{2g}(t) = \{\hat{Loc}_{2g}(t), Cov_{2g}(t)\} \quad (5.7)$$

correspondientes a una misma localización, referidas a un sistema de referencia global y obtenidas en un mismo instante t por dos sensores diferentes, se pretende calcular la mejor estimación $\hat{Loc}_f(t) = (\hat{x}_f(t), \hat{y}_f(t), \hat{\phi}_f(t))^T$ de la posición $Loc_f = (x_f(t), y_f(t), \phi_f(t))^T$ cuya probabilidad de pertenencia a ambas distribuciones sea máxima (figura 5.3), así como la incertidumbre $Cov_f(t)$ asociada a esta mejor estimación.

Para el cálculo de probabilidades es preciso asumir una determinada distribución de los errores. Entre las distintas distribuciones de probabilidad, la distribución normal se aproxima a lo ob-

²El desarrollo puede generalizarse a n sensores.

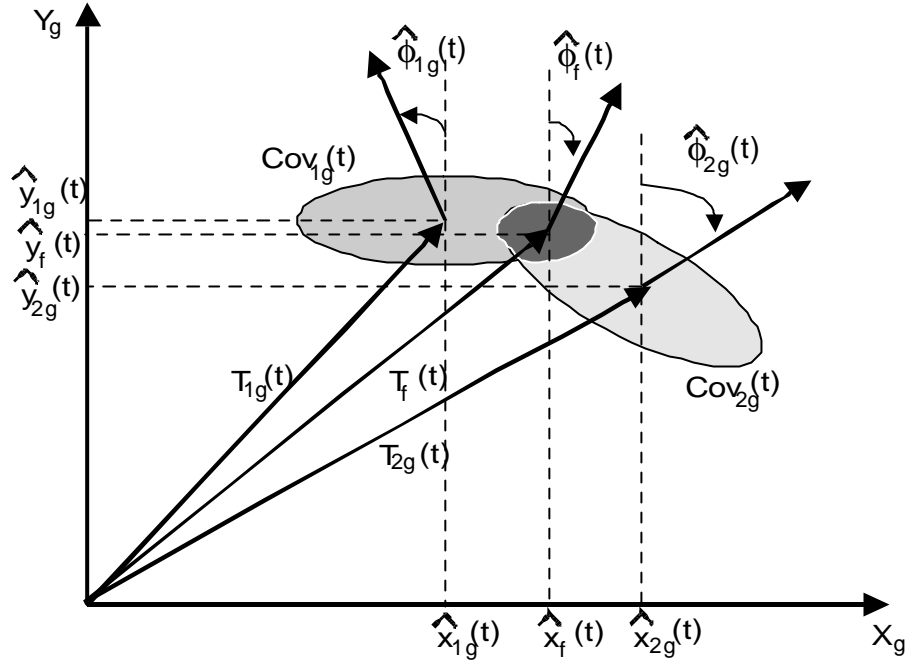


Figura 5.3: Fusión de transformaciones aproximadas

servado en muchos procesos de medición donde no intervienen errores sistemáticos. Por ello, suponer una distribución normal de los errores resulta bastante acertada tras eliminar los errores sistemáticos del modelo de incertidumbre mediante un proceso previo de calibrado. Además, debido a que las sucesivas estimaciones de la posición del vehículo se efectúan en función de la información obtenida por diferentes sistemas de percepción sensorial que actúan sumando sus efectos, siendo cada efecto individual de poca importancia respecto al conjunto, por el teorema central del límite es esperable que los resultados sigan una distribución gaussiana.

Así, si los datos obtenidos por una y otra fuente sensorial en un determinado instante t siguen distribuciones gaussianas o normales, sus funciones de probabilidad $P_{1g}(Loc_f(t))$ y $P_{2g}(Loc_f(t))$ se expresan como (ecuación (5.3) para variables 3-dimensionales):

$$P_{1g}(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))^T Cov_{1g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{1g}(t)|}} \quad (5.8)$$

$$P_{2g}(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{2g}(t))^T Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{2g}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{2g}(t)|}} \quad (5.9)$$

donde $\widehat{Loc}_{1g}(t) = (\widehat{x}_{1g}(t), \widehat{y}_{1g}(t), \widehat{\phi}_{1g}(t))^T$ y $\widehat{Loc}_{2g}(t) = (\widehat{x}_{2g}(t), \widehat{y}_{2g}(t), \widehat{\phi}_{2g}(t))^T$ son las posiciones estimadas por el *sensor1* y el *sensor2* respectivamente y $Cov_{1g}(t)$ y $Cov_{2g}(t)$ son las matrices de covarianza o incertidumbres asociadas a las estimaciones realizadas por uno y otro sensor a

bordo del robot, que por la ecuación (5.2) tienen la forma:

$$Cov_{1g}(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{x_{1g}}^2 & \rho_{x_1 y_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{1g}} & \rho_{x_1 \phi_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} \\ \rho_{x_1 y_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{1g}} & \sigma_{y_{1g}}^2 & \rho_{y_1 \phi_1} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} \\ \rho_{x_1 \phi_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{y_1 \phi_1} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \sigma_{\phi_{1g}}^2 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

$$Cov_{2g}(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{x_{2g}}^2 & \rho_{x_2 y_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{x_2 \phi_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_2 y_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{2g}} & \sigma_{y_{2g}}^2 & \rho_{y_2 \phi_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_2 \phi_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \rho_{y_2 \phi_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \sigma_{\phi_{2g}}^2 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

siendo $\rho_1 = (\rho_{x_1 y_1}, \rho_{x_1 \phi_1}, \rho_{y_1 \phi_1})$ y $\rho_2 = (\rho_{x_2 y_2}, \rho_{x_2 \phi_2}, \rho_{y_2 \phi_2})$ los coeficientes de correlación de los errores de las medidas estimadas por el *sensor1* y el *sensor2* respectivamente.

Como en cada instante la mejor estimación de la posición del vehículo resulta ser aquella cuya probabilidad de pertenencia a ambas distribuciones normales o función de probabilidad conjunta es máxima, se define a continuación la función de probabilidad conjunta. Dicha función, al provenir de dos distribuciones normales, ecuaciones (5.8) y (5.9), es otra distribución normal de la forma:

$$P(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\begin{pmatrix} Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t) \\ Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) & Cov_{1g2g}(t) \\ Cov_{1g2g}^T(t) & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t) \\ Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix} \right)}}{(2\pi)^3 \sqrt{\left| \begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) & Cov_{1g2g}(t) \\ Cov_{1g2g}^T(t) & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix} \right|}} \quad (5.12)$$

La matriz de covarianza de esta distribución de probabilidad conjunta vale:

$$\begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) & Cov_{1g2g}(t) \\ Cov_{1g2g}^T(t) & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix} = \quad (5.13)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x_{1g}}^2 & \rho_{x_1 y_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{1g}} & \rho_{x_1 \phi_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{x_1 x_2} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{x_{2g}} & \rho_{x_1 y_2} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{x_1 \phi_2} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_1 y_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{1g}} & \sigma_{y_{1g}}^2 & \rho_{y_1 \phi_1} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{y_1 x_2} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{x_{2g}} & \rho_{y_1 y_2} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{y_1 \phi_2} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_1 \phi_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{y_1 \phi_1} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \sigma_{\phi_{1g}}^2 & \rho_{\phi_1 x_2} \sigma_{\phi_{1g}} \sigma_{x_{2g}} & \rho_{\phi_1 y_2} \sigma_{\phi_{1g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{\phi_1 \phi_2} \sigma_{\phi_{1g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_1 x_2} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{x_{2g}} & \rho_{y_1 x_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{1g}} & \rho_{\phi_1 x_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \sigma_{x_{2g}}^2 & \rho_{x_2 y_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{x_2 \phi_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_1 y_2} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{y_1 y_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{y_{1g}} & \rho_{\phi_1 y_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{x_2 y_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{2g}} & \sigma_{y_{2g}}^2 & \rho_{y_2 \phi_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ \rho_{x_1 \phi_2} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \rho_{y_1 \phi_2} \sigma_{\phi_{2g}} \sigma_{y_{1g}} & \rho_{\phi_1 \phi_2} \sigma_{\phi_{2g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{x_2 \phi_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \rho_{y_2 \phi_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \sigma_{\phi_{2g}}^2 \end{pmatrix}$$

donde $\rho_{12} = (\rho_{x_1 x_2}, \rho_{x_1 y_2}, \rho_{x_1 \phi_2}, \rho_{y_1 x_2}, \rho_{y_1 y_2}, \rho_{y_1 \phi_2}, \rho_{\phi_1 x_2}, \rho_{\phi_1 y_2}, \rho_{\phi_1 \phi_2})$ representa el coeficiente de correlación entre los errores de las medidas estimadas por el *sensor1* y el *sensor2*.

Por tanto, la matriz de covarianza $Cov_{1g2g}(t)$, representada por el menor formado por las filas 1-3 y columnas 3-6 de la matriz (5.13), es un indicador de la correlación entre los errores de las medidas de los sensores. Si las medidas proporcionadas por los distintos sensores que configuran el sistema sensorial del vehículo estuviesen no-correlacionadas entre sí³, esto es, si $\rho_{12} = 0$, lo que implica que $Cov_{1g2g}(t) = 0$, la matriz de covarianza de la función de distribución conjunta, ecuación (5.13), vale:

$$\begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) & Cov_{1g2g}(t) \\ Cov_{1g2g}^T(t) & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) & 0 \\ 0 & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix} = \quad (5.14)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x_{1g}}^2 & \rho_{x_1 y_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{1g}} & \rho_{x_1 \phi_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{x_1 y_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{y_{1g}} & \sigma_{y_{1g}}^2 & \rho_{y_1 \phi_1} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{x_1 \phi_1} \sigma_{x_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \rho_{y_1 \phi_1} \sigma_{y_{1g}} \sigma_{\phi_{1g}} & \sigma_{\phi_{1g}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_{2g}}^2 & \rho_{x_2 y_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{2g}} & \rho_{x_2 \phi_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ 0 & 0 & 0 & \rho_{x_2 y_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{y_{2g}} & \sigma_{y_{2g}}^2 & \rho_{y_2 \phi_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} \\ 0 & 0 & 0 & \rho_{x_2 \phi_2} \sigma_{x_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \rho_{y_2 \phi_2} \sigma_{y_{2g}} \sigma_{\phi_{2g}} & \sigma_{\phi_{2g}}^2 \end{pmatrix}$$

y la función de probabilidad conjunta dada por la ecuación (5.12) puede expresarse como el producto de las distribuciones normales de partida, ecuaciones (5.8) y (5.9):

$$\begin{aligned} P(Loc_f(t)) &= \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t))^T Cov_{1g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{1g}(t)|}} \\ &\quad \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))^T Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{2g}(t)|}} \\ &= \frac{e^{-\frac{1}{2}[(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t))^T Cov_{1g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t)) + (Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))^T Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))]}{(2\pi)^3 \sqrt{|Cov_{1g}(t)| |Cov_{2g}(t)|}} \end{aligned} \quad (5.15)$$

El que las estimaciones de posición proporcionadas por los sensores a bordo del vehículo sean independientes entre sí, y por tanto su función de probabilidad conjunta pueda expresarse como producto de distribuciones normales, simplifica notablemente el proceso de fusión.

³En cualquier distribución de probabilidad, si las variables son independientes están no-correlacionadas. En el caso de la distribución de probabilidad normal, si dos variables que siguen esta distribución están no correlacionadas son independientes entre sí [Grover 97]. Por ello, al considerar que los errores de las medidas sensoriales se distribuyen según una función de distribución normal, se utilizará indistintamente los términos de independencia y no-correlación.

Pero no siempre las medidas proporcionadas por los sensores a bordo del robot están dotadas de total independencia, esto es, el coeficiente de correlación entre variables ρ_{12} es distinto de cero. Si así ocurriese, para expresar la ecuación (5.12) como el producto de dos distribuciones normales se necesita transformar su matriz de covarianza en una matriz de la forma de la ecuación (5.14), esto es, con el menor formado por las filas 1-3 y columnas 4-6 y con el menor formado por las filas 4-6 y columnas 1-3 iguales a cero. Para ello, la ecuación (5.13) se descompone de la forma:

$$\begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) & Cov_{1g2g}(t) \\ Cov_{1g2g}^T(t) & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} I & 0 \\ -Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t) & I \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

$$\begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t) & 0 \\ 0 & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I & -Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t) \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

Sustituyendo la ecuación (5.16) en el exponente de la la expresión (5.12) y operando se tiene que:

$$\begin{pmatrix} Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t) \\ Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} I & 0 \\ -Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t) & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t) & 0 \\ 0 & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I & -Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t) \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t) \\ Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Loc_f(t) - \hat{Loc}_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t)) \\ Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Cov_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t) & 0 \\ 0 & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Loc_f - \hat{Loc}_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t)) \\ Loc_f - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

Llamando:

$$\tilde{Loc}_{1g}(t) = \hat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)(\hat{Loc}_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t)) \quad (5.18)$$

$$\tilde{Cov}_{1g}(t) = Cov_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t) \quad (5.19)$$

y sustituyendo en la ecuación (5.17), el exponente de la función de probabilidad conjunta dada en la ecuación (5.12) vale:

$$\begin{pmatrix} Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{1g}(t) \\ Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \tilde{Cov}_{1g}(t) & 0 \\ 0 & Cov_{2g}(t) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Loc_f - \tilde{Loc}_{1g}(t) \\ Loc_f - \hat{Loc}_{2g}(t) \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

Por tanto, la función de probabilidad conjunta en el caso de medidas correlacionadas puede también expresarse como el producto de dos distribuciones normales:

$$\begin{aligned} P(Loc_f(t)) &= \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{1g}(t))^T \tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{1g}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|\tilde{Cov}_{1g}(t)|}} \\ &\quad \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))^T Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{2g}(t)|}} \\ &= \frac{e^{-\frac{1}{2}[(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{1g}(t))^T \tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{1g}(t)) + (Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))^T Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t))]}}{(2\pi)^3 \sqrt{|\tilde{Cov}_{1g}(t)| |Cov_{2g}(t)|}} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Así, para llevar a cabo la fusión de la información que sobre la posición del vehículo proporcionan dos sensores diferentes (*sensor1* y *sensor2*) situados a bordo del mismo, es decir, para conseguir en cada instante t la mejor estimación $\hat{Loc}_f(t)$ de la posición del robot $Loc_f(t)$, debe tenerse en cuenta la naturaleza de los errores asociados a las medidas realizadas por los sensores.

El caso más sencillo ocurre cuando los errores son ruidos blancos, esto es, que no están correlacionados consigo mismos o autocorrelacionados. En otros casos, puede suceder que la medida estimada por uno de los sensores se encuentre contaminada con ruido coloreado o autocorrelacionado, es decir, que esté correlacionado en el tiempo con otros componentes de la secuencia. Además, independientemente de que el ruido asociado a las medidas sea blanco o coloreado, puede ocurrir que la información proporcionada por uno y otro sensor posea componentes comunes, esto es, que se encuentren correlacionadas aunque hayan sido obtenidas con sensores diferentes. Esta última circunstancia puede deberse, por ejemplo, a vibraciones del propio vehículo que originan errores comunes en los sensores a bordo del mismo.

A continuación se desarrolla de forma general el proceso matemático que permite la fusión de la información que acerca de la posición proporcionan un *sensor1* y un *sensor2* a bordo del robot atendiendo a la naturaleza del error asociado a sus estimaciones. Así, se analizarán cuatro casos:

Caso 1: Ruido blanco y no correlacionado.

Caso 2: Ruido blanco correlacionado.

Caso 3: Ruido coloreado y no correlacionado entre sí.

Caso 4: Ruido coloreado y correlacionado.

La fusión de información sensorial de medidas contaminadas con ruido blanco y no correlacionado en el espacio de las transformaciones aproximadas fue propuesta por Smith y Cheeseman [Smith 86]. En esta memoria se ha ampliado dicho desarrollo a medidas donde los errores asociados a las mismas se encuentran correlacionados entre sí y/o autocorrelacionado o coloreado.

5.3.1 Caso 1: Ruido blanco y no correlacionado

Un ruido blanco se define como un proceso aleatorio que tiene una función de densidad espectral plana, esto es, que no varía con la frecuencia o bien esta variación es muy lenta. Así, partiendo de esta definición, si se denota como Cov_i la amplitud de la función espectral de un ruido blanco ($S_{j\omega} = Cov_i$), su representación gráfica vendrá dada por la figura 5.4a.

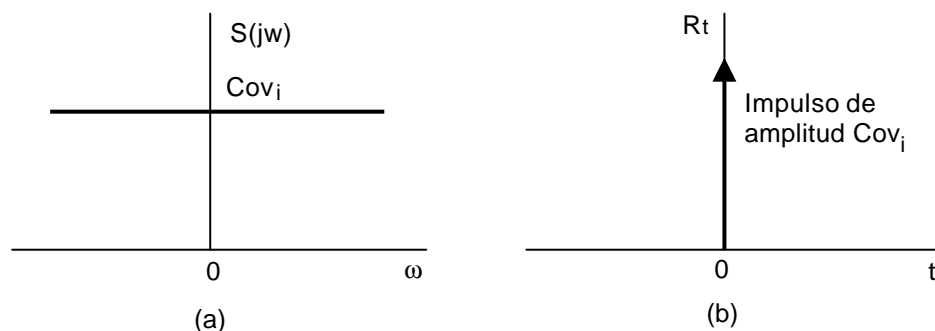


Figura 5.4: Ruido blanco: a) Función de densidad espectral, b) Función de autocorrelación

En un proceso aleatorio, la función de autocorrelación R_t indica cómo se encuentra correlacionada cada componente de la variable aleatoria consigo misma en dos instantes de tiempo i y j diferentes. La función de autocorrelación es un descriptor importante de un proceso aleatorio. Cualitativamente, si la función de autocorrelación cambia rápidamente el proceso varía rápidamente con el tiempo, por lo que un proceso que cambia lentamente tendrá una función de autocorrelación que varía lentamente con el tiempo. Existe así una relación entre la función de densidad espectral y la función de autocorrelación: la función de densidad espectral se define matemáticamente como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. Por tanto, para el caso de un ruido e_b se tiene que:

$$S_{j\omega} = \mathcal{F}\{R_t\} = \mathcal{F}\{E[e_b(i) e_b(j)]\} \quad (5.22)$$

Si este ruido es blanco, al ser su función de densidad espectral constante ($S_{j\omega} = Cov_i$), la ecuación (5.22) queda como:

$$R_t(e_b) = \mathcal{F}\{E[e_b(i) e_b(j)]\} = \mathcal{F}^{-1}[S_{j\omega} = Cov_i] = Cov_i \delta(i, j) \quad (5.23)$$

donde $\delta(i, j)$ representa el delta de Kronecker, definido como:

$$\delta(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (5.24)$$

La representación gráfica de la función de autocorrelación de un ruido blanco (en el espacio unidimensional) se muestra en la figura 5.4b. Se deduce así que la función de autocorrelación de un ruido blanco tiene un valor distinto de cero sólo en el instante inicial y vale cero cuando el tiempo tiende a infinito. En otras palabras, un ruido blanco es un ruido no correlacionado con los restantes componentes de la secuencia, esto es, no se encuentra correlacionado consigo mismo.

Se estudia a continuación la fusión de las medidas proporcionadas por dos sensores *sensor1* y *sensor2*, cuando dichas medidas contienen errores $e_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t)$ considerados ruidos blancos. Sus funciones de autocorrelación $R_t(e_{1g}(t))$ y $R_t(e_{2g}(t))$ valen:

$$R_t(e_{1g}(t)) = E[e_{1g}(i) e_{1g}^T(j)] = Cov_{1g}(t) \delta(i, j) \quad (5.25)$$

$$R_t(e_{2g}(t)) = E[e_{2g}(i) e_{2g}^T(j)] = Cov_{2g}(t) \delta(i, j) \quad (5.26)$$

donde $\delta(i, j)$ es la función delta de Kronecker, ecuación (5.24), y $Cov_{1g}(t)$ y $Cov_{2g}(t)$ son las matrices de covarianza o incertidumbres asociadas a las estimaciones del *sensor1* y *sensor2*, respectivamente.

Supóngase además en este desarrollo que los errores $e_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t)$ se encuentran no correlacionados entre sí ($\rho_{12} = 0$), esto es:

$$E[e_{1g}(i) e_{2g}^T(j)] = E[e_{2g}(i) e_{1g}^T(j)] = 0 \quad (5.27)$$

La mejor estimación de la posición del vehículo $\hat{Loc}_f(t)$ será aquella que haga máxima la probabilidad de pertenencia de dicha posición estimada a las distribuciones de probabilidad $P_{1g}(Loc_f(t))$ y $P_{2g}(Loc_f(t))$ dadas por uno y otro sensor, esto es, a la función de probabilidad conjunta $P(Loc_f(t))$. Al considerarse independientes las medidas obtenidas por los sensores, la función de probabilidad conjunta es la indicada por la ecuación (5.15). Así:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(Loc_f(t))}{\partial Loc_f(t)} &= 2 Cov_{1g}^{-1}(t) (Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) + \\ &2 Cov_{2g}^{-1}(t) (Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{2g}(t)) = 0 \end{aligned} \quad (5.28)$$

Como se pretende obtener la mejor estimación $\widehat{Loc}_f(t)$ de la posición real del vehículo $Loc_f(t)$, se sustituye en la expresión (5.28) $Loc_f(t)$ por $\widehat{Loc}_f(t)$, esto es:

$$2 Cov_{1g}^{-1}(t) (\widehat{Loc}_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) + 2 Cov_{2g}^{-1}(t) (\widehat{Loc}_f(t) - \widehat{Loc}_{2g}(t)) = 0 \quad (5.29)$$

Despejando $\widehat{Loc}_f(t)$ de la ecuación (5.29) se tiene que:

$$\widehat{Loc}_f(t) = (Cov_{1g}^{-1}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t))^{-1} (Cov_{1g}^{-1}(t) \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t) \widehat{Loc}_{2g}(t)) \quad (5.30)$$

Por otro lado, el lema de inversión de matrices establece que:

$$(Cov_{1g}^{-1}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t))^{-1} = Cov_{1g}(t) - Cov_{1g}(t) (Cov_{2g}(t) + Cov_{1g}(t))^{-1} Cov_{1g}(t) \quad (5.31)$$

Sustituyendo (5.31) en la ecuación (5.30):

$$\begin{aligned} \widehat{Loc}_f(t) &= (Cov_{1g}(t) - Cov_{1g}(t) (Cov_{2g}(t) + Cov_{1g}(t))^{-1} Cov_{1g}(t)) \\ &(Cov_{1g}^{-1}(t) \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t) \widehat{Loc}_{2g}(t)) \end{aligned} \quad (5.32)$$

Con objeto de agilizar el cálculo, se define la matriz $M(t)$ como la suma de las matrices de covarianza $Cov_{1g}(t)$ y $Cov_{2g}(t)$:

$$M(t) = Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t) \quad (5.33)$$

que aplicada a la expresión (5.32) permite obtener:

$$\widehat{Loc}_f(t) = (Cov_{1g}(t) - Cov_{1g}(t) M^{-1}(t) Cov_{1g}(t)) (Cov_{1g}^{-1}(t) \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t) \widehat{Loc}_{2g}(t)) \quad (5.34)$$

Operando la ecuación (5.34):

$$\begin{aligned}
\widehat{Loc}_f(t) &= Cov_{1g}(t)Cov_{1g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g}(t)M^{-1}(t)M(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) \\
&\quad - Cov_{1g}(t)M^{-1}(t)Cov_{1g}(t)Cov_{1g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{1g}(t) - Cov_{1g}(t)M^{-1}(t)Cov_{1g}(t) \\
Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) &= \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g}(t)M^{-1}(t)(M(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) \\
&\quad - \widehat{Loc}_{1g}(t) - Cov_{1g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t)) \\
&= \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g}(t)M^{-1}(t)((M(t) - Cov_{1g}(t))Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))
\end{aligned} \tag{5.35}$$

Si se sustituye la matriz $M(t)$, ecuación (5.33), en la expresión (5.35):

$$\begin{aligned}
\widehat{Loc}_f(t) &= \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g}(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1}((Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t) - Cov_{1g}(t)) \\
Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) &= \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g}(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1} \\
(Cov_{2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) &= \widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g}(t) \\
(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1}(\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))
\end{aligned} \tag{5.36}$$

Es decir, la mejor estimación $\widehat{Loc}_f(t)$ de la posición del vehículo $Loc_f(t)$ viene dada por la expresión:

$$\widehat{Loc}_f(t) = \widehat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) \tag{5.37}$$

donde el término $G(t)$ o término de ganancia vale:

$$G(t) = Cov_{1g}(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1} \tag{5.38}$$

El término $G(t)$, ecuación (5.38), pondera la diferencia entre la mejor estimación obtenida a partir de los sensores a bordo del robot. Al considerar que los errores asociados a las medidas cumplen las condiciones ideales de ruido blanco independientes entre sí, $G(t)$ coincide con la ganancia del filtro de Kalman expresada en el espacio de las transformaciones aproximadas [Smith 86].

Una vez obtenida la mejor estimación de la posición del vehículo $\widehat{Loc}_f(t)$, para completar la transformación aproximada $T_f(t) = \{\widehat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$ queda por calcular la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ o incertidumbre en la estimación.

Para obtener la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ se requiere obtener en primer lugar el error cometido en la estimación, que viene dado por la expresión:

$$e_f(t) = Loc_f(t) - \widehat{Loc}_f(t) \quad (5.39)$$

Sustituyendo la ecuación (5.37) en (5.39), el error $e_f(t)$ vale:

$$\begin{aligned} e_f(t) &= Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t) - G(t)(\widehat{Loc}_{2g}(t) - Loc_f(t) + Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) \\ &= e_{1g}(t) + G(t)(e_{2g}(t) - e_{1g}(t)) \end{aligned} \quad (5.40)$$

ya que $e_{1g}(t) = Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t) = Loc_f(t) - \widehat{Loc}_{2g}(t)$.

De la ecuación (5.40) se deduce que el error $e_f(t) = Loc_f(t) - \widehat{Loc}_f(t)$ en la estimación de la posición sigue una distribución normal, por ser combinación lineal de dos variables aleatorias $e_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t)$ con distribuciones gaussianas.

Así, una vez obtenido el error, la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ se obtiene como:

$$Cov_f(t) = E \left[e_f(t) e_f^T(t) \right] \quad (5.41)$$

Introduciendo la expresión (5.40) en la ecuación (5.41) se obtiene:

$$Cov_f(t) = E \left[(e_{1g}(t) + G(t)(e_{2g}(t) - e_{1g}(t))) (e_{1g}(t) + G(t)(e_{2g}(t) - e_{1g}(t)))^T \right] \quad (5.42)$$

Operando la expresión (5.42):

$$\begin{aligned} Cov_f(t) &= E \left[e_{1g}(t) e_{1g}^T(t) \right] + E \left[e_{1g}(t) e_{2g}^T(t) \right] G^T(t) - E \left[e_{1g}(t) e_{1g}^T(t) \right] G^T(t) \\ &+ G(t) E \left[e_{2g}(t) e_{1g}^T(t) \right] + G(t) E \left[e_{2g}(t) e_{2g}^T(t) \right] G^T(t) - G(t) E \left[e_{2g}(t) e_{1g}^T(t) \right] G^T(t) \\ &- G(t) \left[e_{1g}(t) e_{1g}^T(t) \right] - G(t) E \left[e_{1g}(t) e_{2g}^T(t) \right] G^T(t) + G(t) E \left[e_{1g}(t) e_{1g}^T(t) \right] G^T(t) \end{aligned} \quad (5.43)$$

Al tratarse $e_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t)$ de ruidos blancos y no correlacionados entre sí, aplicando las ecuaciones (5.25), (5.26) y (5.27), la expresión (5.43) queda como:

$$\begin{aligned}
Cov_f(t) &= Cov_{1g}(t) - Cov_{1g}(t)G^T + G(t)Cov_{2g}(t)G^T - G(t)Cov_{1g} - G(t)Cov_{1g}(t)G^T(t) \\
&= Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g}(t) + [-Cov_{1g}(t) + G(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))] G^T(t) \quad (5.44)
\end{aligned}$$

Sustituyendo en la expresión (5.44) la ecuación de la ganancia $G(t)$, ecuación (5.38), queda que la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ vale:

$$\begin{aligned}
Cov_f(t) &= Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g}(t) + [-Cov_{1g}(t) + Cov_{1g}(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1} \\
&(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))] G^T(t) = Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g}(t) \quad (5.45)
\end{aligned}$$

La ecuación (5.45) representa la matriz de covarianza $Cov_f(t)$, esto es, la incertidumbre asociada a la mejor estimación de la posición del vehículo, que viene dada como función lineal de la ganancia $G(t)$ y de la matriz de covarianza $Cov_{1g}(t)$ o incertidumbre en las estimaciones obtenidas con el *sensor1*.

En resumen, la transformación aproximada $T_f(t) = \{\widehat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$ que representa la mejor estimación de la posición del vehículo en el instante t en coordenadas globales cuando las medidas se encuentran contaminadas con ruido blanco no correlacionado se obtiene aplicando las expresiones dadas por (5.37) y (5.45) [Smith 86]:

$$T_f(t) = \{\widehat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$$

donde :

$$\widehat{Loc}_f(t) = \widehat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))$$

$$Cov_f(t) = Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g}(t)$$

siendo :

$$G(t) = Cov_{1g}(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1}$$

5.3.2 Caso 2: Ruido blanco correlacionado

Supóngase que los ruidos $e_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t)$ asociados a las estimaciones realizadas por los sensores *sensor1* y *sensor2* a bordo del robot son blancos, esto es, se encuentran no correlacionados consigo mismos, ecuaciones (5.25) y (5.26):

$$R_t(e_{1g}(t)) = E \left[e_{1g}(i) e_{1g}^T(j) \right] = Cov_{1g}(t) \delta(i, j)$$

$$R_t(e_{2g}(t)) = E \left[e_{2g}(i) e_{2g}^T(j) \right] = Cov_{2g}(t) \delta(i, j)$$

Sin embargo, a diferencia del apartado 5.3.1, los errores asociados a las estimaciones realizadas por el *sensor1* y el *sensor2* a bordo del robot poseen componentes comunes, esto es, se encuentran correlacionados entre sí. Si los errores en las medidas proporcionadas por los sensores poseen componentes comunes, esto es, si se encuentran correlacionadas entre sí, el coeficiente de correlación $\rho_{12} = (\rho_{x_1 x_2}, \rho_{x_1 y_2}, \rho_{x_1 \phi_2}, \rho_{y_1 x_2}, \rho_{y_1 y_2}, \rho_{y_1 \phi_2}, \rho_{\phi_1 x_2}, \rho_{\phi_1 y_2}, \rho_{\phi_1 \phi_2})$ es distinto de cero, y la matriz de correlación $Cov_{1g2g}(t)$ de los errores en las estimaciones realizadas por el *sensor1* y *sensor2* no es nula, sino que viene dada por:

$$E \left[e_{1g}(i) e_{2g}^T(j) \right] = Cov_{1g2g}(t) \delta(i, j) \quad (5.46)$$

$$E \left[e_{2g}(i) e_{1g}^T(j) \right] = Cov_{1g2g}^T(t) \delta(i, j) \quad (5.47)$$

En este apartado se estudia la fusión de medidas cuyos errores asociados se encuentran no correlacionados consigo mismos (ruidos blancos) pero sí correlacionados entre sí.

Siguiendo el mismo proceso que el desarrollado en el apartado 5.3.1, la mejor estimación de la posición del vehículo $\hat{Loc}_f(t)$ será aquella que haga máxima la probabilidad de pertenencia de dicha posición estimada a las distribuciones de probabilidad $P_{1g}(Loc_f(t))$ y $P_{2g}(Loc_f(t))$ de las medidas de uno y otro sensor, esto es, a la función de probabilidad conjunta $P(Loc_f(t))$. Al considerarse correlacionadas las medidas obtenidas por los sensores, la función de probabilidad conjunta es la indicada por la ecuación (5.21). Así:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(Loc_f(t))}{\partial Loc_f(t)} &= 2(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)((I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))Loc_f(t) \\ &- \hat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\hat{Loc}_{2g}(t)) + 2Cov_{2g}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{2g}(t)) = 0 \end{aligned} \quad (5.48)$$

Como se pretende obtener la mejor estimación $\hat{Loc}_f(t)$ de la posición real del vehículo $Loc_f(t)$, se sustituye en la expresión (5.48) $Loc_f(t)$ por $\hat{Loc}_f(t)$, esto es:

$$2(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)((I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\hat{Loc}_f(t)$$

$$-\widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) + 2Cov_{2g}^{-1}(t)(\widehat{Loc}_f(t) - \widehat{Loc}_{2g}(t)) = 0 \quad (5.49)$$

Despejando $\widehat{Loc}_f(t)$ de la ecuación (5.49):

$$\begin{aligned} \widehat{Loc}_f(t) = & \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)) + Cov_{2g}^{-1}(t) \right]^{-1} \\ & \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{1g}(t) + (Cov_{2g}^{-1}(t) - (I - Cov_{1g2g}(t) \right. \\ & \left. Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t) \right] \end{aligned} \quad (5.50)$$

Con objeto de simplificar los cálculos, se definen las matrices $Cov_A^{-1}(t)$ y $Cov_B^{-1}(t)$ como:

$$Cov_A^{-1}(t) = (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \quad (5.51)$$

y

$$Cov_B^{-1}(t) = Cov_{2g}^{-1}(t) - (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t) \quad (5.52)$$

Así, sustituyendo las ecuaciones (5.51) y (5.52) en la ecuación (5.50), la mejor estimación $\widehat{Loc}_f(f)$ de la posición del vehículo en el instante t queda expresada como:

$$\widehat{Loc}_f(t) = (Cov_A^{-1} + Cov_B^{-1}(t))^{-1}(Cov_A^{-1}(t)\widehat{Loc}_{1g}(t) + Cov_B^{-1}(t)\widehat{Loc}_{2g}(t)) \quad (5.53)$$

De esta forma, la mejor estimación para medidas cuyo ruido asociado es blanco y correlacionado entre sí coincide con el prototipo de ecuación dada en (5.30), esto es, con la obtenida para el caso de medidas contaminadas con ruido blanco no correlacionado entre sí.

Así pues, siguiendo el proceso matemático indicado para la fusión de medidas contaminadas con ruido blanco no correlacionado desarrollado en el apartado 5.3.1, la mejor estimación $\widehat{Loc}_f(t)$ de la posición del vehículo $Loc_f(t)$ en el instante t y el error $e_f(t)$ cometido en la misma cuando los errores son blancos y se encuentran correlacionados entre sí vienen dadas por las expresiones (5.37) y (5.40) respectivamente:

$$\begin{aligned} \widehat{Loc}_f(t) &= \widehat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t)) \\ e_f(t) &= e_{1g}(t) + G(t)(e_{2g}(t) - e_{1g}(t)) \end{aligned}$$

variando el término de ganancia $G(t)$ respecto al obtenido para el caso de medidas contaminadas con ruido blanco y no correlacionado, dada por la expresión (5.38). Así, el término de ganancia $G(t)$ para el caso de medidas cuyo error es blanco y correlacionado se obtiene al sustituir en la ecuación (5.38) las expresiones (5.51) y (5.52), donde $Cov_A(t)$, ecuación (5.51), hace el papel de $Cov_{1g}(t)$ y $Cov_B(t)$, ecuación (5.52), el papel de $Cov_{2g}(t)$, esto es:

$$\begin{aligned} G(t) &= Cov_A(t)(Cov_A(t) + Cov_B(t))^{-1} \Rightarrow \\ G(t) &= \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \right]^{-1} \left[((I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t))^{-1} \right. \\ &\quad \left. + (Cov_{2g}^{-1}(t) - (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))^{-1} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (5.54)$$

Aplicando el lema de inversión de matrices, ecuación (5.31), a la ecuación (5.54), se tiene que:

$$\begin{aligned} G(t) &= \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \right]^{-1} \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) - \right. \\ &\quad (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)((I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \\ &\quad \left. (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)) + Cov_{2g}^{-1}(t))^{-1}(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \right] \end{aligned} \quad (5.55)$$

Aplicando en la ecuación (5.55) que para dos matrices A y B se cumple que $(A \cdot B)^{-1} = B^{-1} \cdot A^{-1}$:

$$\begin{aligned} G(t) &= \tilde{Cov}_{1g}(t)(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))^{-1} \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) - \right. \\ &\quad (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)((I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \\ &\quad \left. (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)) + Cov_{2g}^{-1}(t))^{-1}(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \right] \end{aligned} \quad (5.56)$$

Operando la expresión (5.56) se obtiene que la ganancia $G(t)$ cuando las medidas que intervienen en el proceso de fusión están contaminadas con ruido blanco y se encuentran correlacionadas entre sí vale:

$$\begin{aligned} G(t) &= I - \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)) + Cov_{2g}^{-1}(t) \right]^{-1} \\ &\quad (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \end{aligned} \quad (5.57)$$

Nótese que si el ruido asociado a las medidas obtenidas por el *sensor1* y el *sensor2* estuviesen no correlacionadas, esto es, si $Cov_{1g2g}(t)$ vale cero, la ecuación (5.57) queda como:

$$G(t) = I - \left[\tilde{C}ov_{1g}^{-1}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t) \right]^{-1} \tilde{C}ov_{1g}^{-1}(t) \quad (5.58)$$

donde aplicando el lema de inversión de matrices:

$$\begin{aligned} G(t) &= I - \left[\tilde{C}ov_{1g}(t) - \tilde{C}ov_{1g}(t)(\tilde{C}ov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1}\tilde{C}ov_{1g}(t) \right] \tilde{C}ov_{1g}^{-1}(t) \\ &= I - \left[I - \tilde{C}ov_{1g}(t)(\tilde{C}ov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1} \right] \\ &= \tilde{C}ov_{1g}(t)(\tilde{C}ov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1} \end{aligned} \quad (5.59)$$

Sustituyendo $\tilde{C}ov_{1g}(t)$ por $Cov_{1g}(t)$ (esto es, aplicando en la expresión (5.19) que las medidas están no correlacionadas: $Cov_{1g2g}(t) = 0$), se tiene para $G(t)$ la expresión (5.38) para el caso de ruido blanco no correlacionado deducida en el apartado 5.3.1.

Para terminar de componer la transformación aproximada $T_f(t) = \{\hat{L}oc_f(t), Cov_f(t)\}$ que representa la mejor estimación de la posición del vehículo $\hat{L}oc_f(t)$ obtenida a partir de las estimaciones proporcionadas por los sensores a bordo del robot, así como la incertidumbre asociada a dicha estimación, queda por calcular la expresión para $Cov_f(t)$. Esta matriz de covarianza $Cov_f(t)$ resulta de sustituir las expresiones (5.25), (5.26) (ruido blanco) y (5.46) y (5.47) (ruido correlacionado) en la ecuación (5.43), obteniéndose:

$$\begin{aligned} Cov_f(t) &= Cov_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)G^T(t) - Cov_{1g}(t)G^T + G(t)Cov_{1g2g}^T(t) \\ &+ G(t)Cov_{2g}(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g2g}^T(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g2g}(t)G^T(t) \\ &+ G(t)Cov_{1g}(t)G^T(t) \end{aligned} \quad (5.60)$$

Nótese que si los errores asociados a las medidas considerados blancos no estuviesen correlacionados entre sí, esto es, si $Cov_{1g2g}(t)$ vale cero, la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ indicada en la expresión (5.60) vendría dada por la expresión (5.45) deducida en el apartado 5.3.1.

En resumen, la transformación aproximada $T_f(t) = \{\hat{L}oc_f(t), Cov_f(t)\}$ que representa la mejor estimación de la posición del vehículo en el instante t en coordenadas globales cuando las medidas se encuentran contaminadas por ruido blanco correlacionado entre sí se obtiene aplicando las expresiones dadas por (5.37) y (5.60) [Pozo-Ruz 01a]:

$$T_f(t) = \{\widehat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$$

donde :

$$\widehat{Loc}_f(t) = \widehat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))$$

$$\begin{aligned} Cov_f(t) = & Cov_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)G^T(t) - Cov_{1g}(t)G^T + G(t)Cov_{1g2g}^T(t) \\ & + G(t)Cov_{2g}(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g2g}^T(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g2g}(t)G^T(t) \\ & + G(t)Cov_{1g}(t)G^T(t) \end{aligned}$$

siendo :

$$G(t) = I - \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)) + Cov_{2g}^{-1}(t) \right]^{-1} \\ (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)$$

$$\tilde{Cov}_{1g}(t) = Cov_{1g}(t) - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)Cov_{1g2g}^T(t)$$

5.3.3 Caso 3: Ruido coloreado y no correlacionado entre sí

Hasta ahora se ha considerado que los ruidos asociados a las estimaciones realizadas por el *sensor1* y el *sensor2* a bordo del robot son ruidos blancos, esto es, cada componente del vector de error se encuentra no correlacionada con el resto de los componentes de la secuencia. Matemáticamente, esto implica una función de autocorrelación R_t expresada como una función impulso con amplitud igual a la matriz de covarianza.

En este apartado se estudiará la fusión de medidas donde, en una de ellas, cada componente del error asociado a la misma se encuentran correlacionada consigo misma, esto es, está contaminada con un ruido coloreado o autocorrelacionado. Además, se considerará que los errores $e_{1g}(t)$ y $e_{2g}(t)$ asociados a las estimaciones realizadas con el *sensor1* y el *sensor2* se encuentran no correlacionados, esto es, $\rho_{12} = 0$ y $Cov_{1g2g}(t) = 0$.

Así, considérese por ejemplo que cada componente del error $e_{2g}(t)$ asociado a las medidas proporcionadas por el *sensor2* se encuentra correlacionada consigo misma, esto es, existe una relación entre el error en la estimación realizada en el instante t y el error en estimaciones anteriores. Este ruido coloreado puede descomponerse en una componente coloreada y en una componente blanca, tal y como se muestra a continuación [Chui 90]:

$$e_{2g}(t) = \text{ruido coloreado} + \text{ruido blanco} = Cov_{color}e_{2g}(t-1) + e_b(t) \quad (5.61)$$

En la expresión (5.61), $Cov_{color}e_{2g}(t-1)$ representa la componente coloreada del ruido $e_{2g}(t)$ y

viene dada como una matriz constante Cov_{color} obtenida mediante el ajuste de mínimos cuadrados multiplicada por componentes anteriores de la secuencia del error $e_{2g}(t)$. En esta misma expresión (5.61), $e_b(t)$ es la componente blanca del ruido $e_{2g}(t)$, cuya matriz de covarianza Cov_{blanco} es también constante:

$$R_t(e_b(t)) = E [e_b(t) e_b(t)^T] = Cov_{blanco} \delta(i, j) \quad (5.62)$$

Al ser un ruido coloreado, esto es, cada componente se encuentra correlacionada consigo misma, la función de autocorrelación de $e_{2g}(t)$, $R_t(e_{2g}(t)) = E [e_{2g}(t) e_{2g}(t)^T] = Cov_{2g}(t)$, no se corresponde con una función impulso, sino que tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} Cov_{2g}(t) &= E [e_{2g}(t) e_{2g}(t)^T] = E [(Cov_{color} e_{2g}(t-1) + e_b) (Cov_{color} e_{2g}(t-1) + e_b)^T] \\ &= Cov_{color} E [e_{2g}(t-1) e_{2g}(t-1)^T] Cov_{color}^T + Cov_{color} E [e_{2g}(t-1) e_b^T] \\ &\quad + E [e_b e_{2g}(t-1)^T] Cov_{color}^T + E [e_b e_b^T] \\ &= Cov_{color} Cov_{2g}(t-1) Cov_{color}^T + Cov_{blanco} \end{aligned} \quad (5.63)$$

En este desarrollo, al considerar que los errores en las medidas obtenidas a partir de los sensores a bordo del robot se encuentran no correlacionados entre sí, la función de probabilidad conjunta vendrá dada por la ecuación (5.15), donde la matriz de covarianza $Cov_{2g}(t)$ o incertidumbre asociada a las estimaciones realizadas por el *sensor2* posee la expresión dada en la ecuación (5.63).

De esta forma y siguiendo el mismo desarrollo planteado en el apartado 5.3.1, la mejor estimación $\hat{Loc}_f(t)$ de $Loc_f(t)$ y la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ vienen dadas, respectivamente, por las expresiones (5.37) y (5.45):

$$\hat{Loc}_f(t) = \hat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\hat{Loc}_{2g}(t) - \hat{Loc}_{1g}(t)) \quad (5.64)$$

$$Cov_f(t) = Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g}(t) \quad (5.65)$$

y donde la ganancia $G(t)$ se obtiene de sustituir en la expresión (5.38) la matriz de covarianza $Cov_{2g}(t)$ por su expresión dada la ecuación (5.63) correspondiente a medidas cuyo ruido es coloreado. Así, en este caso:

$$\begin{aligned}
G(t) &= Cov_{1g}(t)(Cov_{1g}(t) + Cov_{2g}(t))^{-1} \\
&= Cov_{1g}(t) \left[Cov_{1g}(t) + Cov_{color}Cov_{2g}(t-1)Cov_{color}^T + Cov_{blanco} \right]^{-1}
\end{aligned} \tag{5.66}$$

Por tanto, la transformación aproximada $T_f(t) = \{\widehat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$ que representa la mejor estimación de la posición del vehículo en el instante t en coordenadas globales cuando el error asociado a las estimaciones realizadas por uno de los sensores a bordo del robot se encuentre autocorrelacionado (ruido coloreado) pero no exista correlación entre los errores de las estimaciones realizadas por los distintos sensores se obtiene aplicando las ecuaciones (5.37) y (5.45) [Pozo-Ruz 01a]:

$$T_f(t) = \{\widehat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$$

donde :

$$\widehat{Loc}_f(t) = \widehat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\widehat{Loc}_{2g}(t) - \widehat{Loc}_{1g}(t))$$

$$Cov_f(t) = Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g}(t)$$

siendo :

$$G(t) = Cov_{1g}(t) \left[Cov_{1g}(t) + Cov_{color}Cov_{2g}(t-1)Cov_{color}^T + Cov_{blanco} \right]^{-1}$$

5.3.4 Caso 4: Ruido coloreado y correlacionado

Supóngase ahora que, al igual que en el caso anterior, cada componente del error asociado a las estimaciones de posición realizadas por uno de los sensores, por ejemplo el *sensor2*, se encuentra correlacionada consigo misma, esto es, las medidas proporcionadas por dicho sensor están contaminadas con ruido coloreado o autocorrelacionado. Considérese además que los errores asociados a las medidas proporcionadas por uno y otro sensor se encuentran correlacionadas entre sí, esto es, el coeficiente de correlación ρ_{12} es distinto de cero, y por tanto la matriz $Cov_{1g2g}(t)$ no es nula. Este caso es, por tanto, una combinación de los ya analizados en los apartados 5.3.2 y 5.3.3.

Al tratarse de medidas correlacionadas, en la técnica de fusión la función de probabilidad conjunta es la indicada en la expresión (5.21), pero al considerarse que el error asociado a las estimaciones realizadas por el *sensor2* es coloreado o autocorrelacionado, la matriz de covari-

anza $Cov_{2g}(t)$ se sustituye por la indicada en la expresión (5.63), tal y como se detalló en el apartado 5.3.3.

De esta forma, la mejor estimación \hat{Loc}_f de la posición del vehículo $Loc_f(t)$ en el instante t viene dada por la expresión:

$$\hat{Loc}_f(t) = \hat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\hat{Loc}_{2g}(t) - \hat{Loc}_{1g}(t)) \quad (5.67)$$

donde la ganancia $G(t)$ es la indicada es la expresión (5.57) para ruido correlacionado:

$$G(t) = I - \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t)) + Cov_{2g}^{-1}(t) \right]^{-1} \\ (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \quad (5.68)$$

donde $Cov_{2g}(t)$, al considerarse coloreado o autocorrelacionado el ruido asociado a las estimaciones obtenidas con el *sensor2*, por la expresión (5.63) vale:

$$Cov_{2g}(t) = Cov_{color}Cov_{2g}(t-1)Cov_{color}^T + Cov_{blanco}$$

Siguiendo el mismo proceso, la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ o incertidumbre en el cálculo de la mejor estimación viene dada por la expresión (5.60) para ruido correlacionado, donde también la matriz de covarianza asociada a las estimaciones realizadas con el *sensor2* tiene la expresión indicada en la ecuación (5.63):

$$Cov_f(t) = Cov_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)G^T(t) - Cov_{1g}(t)G^T + G(t)Cov_{1g2g}^T(t) \\ + G(t)Cov_{2g}(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g2g}^T(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g2g}(t)G^T(t) \\ + G(t)Cov_{1g}(t)G^T(t) \quad (5.69)$$

siendo la ganancia $G(t)$ la indicada en la ecuación (5.68).

En resumen, la transformación aproximada $T_f(t) = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$ que representa la mejor estimación de la posición del vehículo en el instante t en coordenadas globales cuando existe correlación entre las medidas y una de ellas se encuentra autocorrelacionada o posee ruido coloreado, se obtiene aplicando las ecuaciones (5.67) y (5.69):

$$T_f(t) = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$$

donde :

$$\hat{Loc}_f(t) = \hat{Loc}_{1g}(t) + G(t)(\hat{Loc}_{2g}(t) - \hat{Loc}_{1g}(t))$$

$$Cov_f(t) = Cov_{1g}(t) + Cov_{1g2g}(t)G^T(t) - Cov_{1g}(t)G^T + G(t)Cov_{1g2g}^T(t) \\ + G(t)Cov_{2g}(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g2g}^T(t)G^T(t) - G(t)Cov_{1g}(t) - G(t)Cov_{1g2g}(t)G^T(t) \\ + G(t)Cov_{1g}(t)G^T(t)$$

siendo :

$$G(t) = I - \left[(I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t) \right. \\ \left. (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t) + Cov_{2g}^{-1}(t)) \right]^{-1} \\ (I - Cov_{1g2g}(t)Cov_{2g}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{1g}^{-1}(t)$$

$$Cov_{2g}(t) = Cov_{color}Cov_{2g}(t-1)Cov_{color}^T + Cov_{blanco}$$

Se ha desarrollado un mecanismo de fusión sensorial de carácter general que permite conocer en cada momento la mejor estimación de la posición del vehículo [Pozo-Ruz 01a] [Pozo-Ruz 01b]. Este método distingue la naturaleza del ruido asociado a las medidas, si se trata de ruido blanco, eso es, no correlacionado consigo mismo, o si es coloreado o autocorrelacionado. Además, tiene en cuenta si los errores en las medidas se encuentran correlacionadas o no correlacionadas entre sí. La aplicación de este mecanismo de fusión al sistema sensorial de cada robot en particular requiere, por un lado, de un análisis previo del error asociado a las estimaciones de cada sensor, de forma que permita determinar si se trata de un ruido blanco o coloreado y de si existe correlación entre los errores de las medidas obtenidas de uno y otro sensor. Conocido el error, se requieren calcular las matrices de covarianza $Cov_{1g}(t)$ y $Cov_{2g}(t)$ asociadas a la incertidumbre de cada sensor. Así, conocido el error y los valores de las matrices de covarianza asociadas a uno y otro sensor, se eligen, dentro de los cuatro casos presentados, las ecuaciones que permiten calcular la mejor estimación de la posición $\hat{Loc}_f(t)$ y la incertidumbre asociada a esa estimación $Cov_f(t)$, esto es, la transformación aproximada $T_f(t) = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$.

Las secciones 5.4 y 5.5 de este capítulo están destinadas a la aplicación del algoritmo de fusión propuesto en el posicionamiento del robot tractor ROJO, teniendo como información de partida la proporcionada por la odometría y por un receptor GPS diferencial. Así, en la sección 5.4 se analiza la naturaleza del ruido asociado a las medidas de uno y otro sensor y se calculan sus matrices de covarianza. En la sección 5.5 se particularizan las ecuaciones de fusión al sistema sensorial propio del robot ROJO.

5.4 Sistema de calibración sensorial. Análisis de ruido

La aplicación de un sistema de navegación basado en la información proporcionada por un conjunto de sensores a bordo de un vehículo requiere de una calibración previa de éstos. En el caso de los sensores internos, la calibración permite corregir los errores sistemáticos en las medidas, esto es, aquellos que permanecen constantes o que crecen con el movimiento del vehículo según una determinada ley o ecuación. Así, los errores sistemáticos son debidos, entre otras causas, a las siguientes:

- diámetros diferentes de las ruedas izquierda y derecha (distinta presión de inflado),
- desajustes en el alineamiento de las ruedas,
- existencia de más de un punto de contacto entre las ruedas y el suelo,
- grado de resolución del odómetro,
- frecuencia de muestreo del sensor.

Mediante la calibración se compara la medida proporcionada por el sensor con la medida real o verdadera. Esto es, calcula el error total cometido en la medición. De este error total, sólo una parte, la que se mantiene constante o evoluciona de forma conocida, es la debida al error sistemático. Para su corrección, se ejerce algún tipo de acción en el cálculo odométrico de forma que se aproxime o ajuste la medida sensorial a la medida real.

Tras la corrección de los errores sistemáticos, los errores presentes en las medidas realizadas por los sensores internos son los denominados no sistemáticos o aleatorios, que difieren según el escenario por el que se mueve el robot. Así, los errores no sistemáticos serán diferentes según si el vehículo se mueve por un sembrado o por un terreno de cemento o asfalto. Estos errores vienen caracterizados por la matriz de covarianza, obtenida como la esperanza matemática de los errores aleatorios al cuadrado. La matriz de covarianza ofrece una estimación de la incertidumbre asociada a la medida obtenida por el sensor y, al calcularse a partir de los errores aleatorios, es particular para cada tipo de escenario.

Son varias las técnicas de calibración de sensores internos para vehículos de interiores propuestas en la literatura [Borenstein 94] [Martínez 94] [Borenstein 96]. Entre ellas, destaca la presentada por Borenstein y su equipo, denominada UMBMark [Borenstein 94], que permite detectar los dos errores sistemáticos dominantes en un sistema odométrico: los errores debidos a la diferencia de diámetros entre ambas ruedas y el error debido a la existencia de más de un punto de contacto entre las ruedas y el suelo. El primero de los errores afecta fundamentalmente al movimiento en

línea recta. Esto es debido a que al ser las velocidades lineales de cada rueda proporcionales a sus diámetros y al ser sensiblemente diferentes los diámetros de cada rueda, el vehículo realizará un pequeño giro cuando se piense que viaja en línea recta. El segundo de los errores afecta al giro del vehículo, pues se desconoce con precisión la distancia entre los puntos de apoyo de las ruedas.

Sin embargo, el método UMBMark sólo puede emplearse para la calibración de odómetros en robots holonómicos o robots capaces de alcanzar una posición y orientación cualesquiera en el plano mediante un único movimiento. Esto es, sólo es aplicable a robots capaces de girar sobre sí mismos. Además, por la metodología de medición de las posiciones iniciales y finales reales, que emplea referencias fijas en el escenario de trabajo, esta técnica es más adecuada para robots de interiores. Así, para el caso del tractor ROJO, que es un robot no holonómico que se desplaza por un entorno de exteriores, este método no resulta válido. Se precisa de un sistema de calibración que se ajuste a las características enunciadas.

El método diseñado para calibrar un robot móvil de exteriores que permite detectar los errores sistemáticos de los sensores internos para su ajuste y eliminación y para obtener la matriz de covarianza de la odometría que permita conocer el grado de confianza de las medidas realizadas se presenta en el apartado siguiente.

5.4.1 Corrección de los errores sistemáticos y cálculo de la matriz de covarianza

La técnica diseñada en entornos de exteriores para la detección de los errores sistemáticos de los odómetros y la caracterización de su matriz de covarianza emplea como medida de la posición real del vehículo la proporcionada por un receptor GPS a bordo del robot. De esta forma es posible obtener, en cada momento, la posición en la que se encuentra el vehículo sin realizar medidas manuales, con el error que esto conlleva, y sin la modificación del entorno de trabajo. Como receptores GPS de referencia se han empleado un receptor con precisión centimétrica (sistema RTK) y el receptor 3100LR12 con corrección Omnistar y precisión submétrica perteneciente al sistema sensorial del tractor. Se realiza así un estudio comparativo de los resultados obtenidos al emplear como referencia uno y otro sistema.

El método propuesto consiste en conducir manualmente el tractor siguiendo un camino recto una distancia suficiente en repetidas ocasiones y grabar cada segundo las posiciones estimadas por el GPS centimétrico y submétrico, las medidas odométricas y las consignas de ángulo de giro del volante dadas por el conductor para mantener al tractor en el camino deseado. El registro de los valores del ángulo de giro del volante permite corregir los errores sistemáticos y mediante la comparación de las posiciones odométricas con las del GPS RTK y el GPS submétrico se

calcularán las matrices de covarianza de la odometría respecto a cada uno de los receptores. El experimento se ha realizado en 15 ocasiones y la distancia del camino recto a recorrer por el vehículo se ha fijado en 100 m. Además, debido a que los errores de odometría serán diferentes en función del terreno por el que se moverá el vehículo, la experimentación que aquí se presenta se ha realizado en las pistas para el movimiento de vehículos en exteriores (circuito ZOCO) de que dispone el IAI-CSIC y que se describe en el apartado 5.6.1 de este capítulo. Sobre estas pistas se desarrollará el agente de comportamiento VE A PUNTO.

A continuación se detalla el procedimiento seguido (figura 5.5).

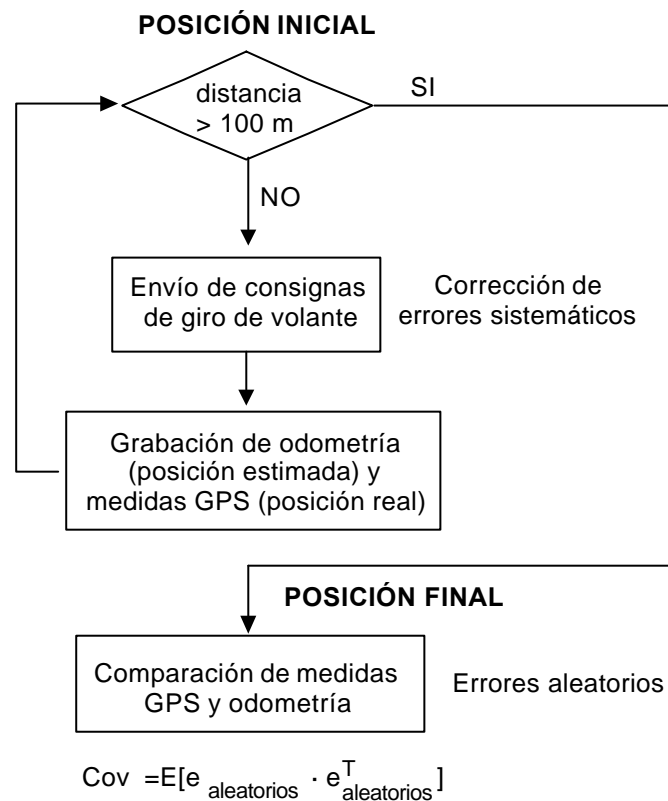


Figura 5.5: Experimentación seguida para la corrección de los errores sistemáticos y cálculo de la matriz de covarianza de la odometría.

Corrección de los errores sistemáticos de la odometría

Los principales errores sistemáticos en el robot ROJO al estimar la posición mediante sensores internos se deben a:

- Desajustes en el alineamiento de las ruedas. Los ejes de las ruedas del tractor no son totalmente rectos, siendo más acusado este efecto en el eje de la rueda izquierda.
- Diferentes diámetros de las ruedas y deformación de las mismas.

- Distribución no uniformemente de la carga del vehículo.
- Existencia de más de un punto de contacto entre las ruedas y el suelo.
- Resolución del odómetro. Al existir 32 imanes en cada una de las ruedas, existe un error máximo por vuelta de $1/32$ veces el perímetro de cada rueda.
- Los sensores con salida analógica producen datos ruidosos.

Estos errores, en especial los cuatro primeros, originan una desviación del vehículo del camino a seguir. Así, se ha comprobado que si se sitúa al tractor ROJO con las ruedas alineadas y se le ordena avanzar hacia delante a una determinada velocidad constante sin ejercer acción alguna sobre el volante, la trayectoria descrita por el robot se desvía respecto de la rectilínea deseada entre siete y ocho grados hacia la izquierda. De esta forma, por cada 100 m. recorridos en la dirección de avance, existe una desviación lateral entre diez y doce metros.

La corrección de esta desviación se realiza al ordenar consignas de giro al volante para mantener al vehículo sobre la trayectoria recta deseada. Para ello, se ha conducido manualmente al tractor a velocidad constante y en repetidas ocasiones siguiendo una línea recta de 100 m. señalada en el suelo, y se han registrado cada segundo la posición real del robot estimada con el receptor GPS centimétrico y submétrico, la posición obtenida por la odometría y el ángulo de giro del volante que el conductor realiza para seguir la línea recta. La figura 5.6 muestra los resultados obtenidos durante los primeros 35 m. de uno de estos experimentos, cuando el tractor viajaba a una velocidad constante de 0.4 m/s aproximadamente. Así, la figura 5.6a muestra la trayectoria real seguida por el tractor obtenida con el GPS centimétrico y la figura 5.6b el ángulo de giro del volante en el tiempo. Se observa que al existir una pequeña desviación de la trayectoria deseada (figura 5.6a) se ordena un giro al volante de aproximadamente ocho grados durante dos segundos para recobrar de nuevo la trayectoria recta (figura 5.6b). A la velocidad de 0.4 m/s, que es la velocidad a la que normalmente viaja el tractor, este giro se ordena de forma sistemática cada cinco segundos. Nótese que al desviarse el tractor hacia la izquierda, el giro del volante es positivo (sentido horario).

Cálculo de la matriz de covarianza de la odometría

Los errores aleatorios, a diferencia de los sistemáticos, no pueden ser corregidos, aunque sí cuantificados mediante la matriz de covarianza, que representa la incertidumbre en la estimación de la posición realizada, en este caso, a través de los sensores internos.

La matriz de covarianza de la odometría Cov_{og} se obtiene como la esperanza matemática de los errores aleatorios al cuadrado, siendo estos errores los resultantes de restar, en cada uno de los

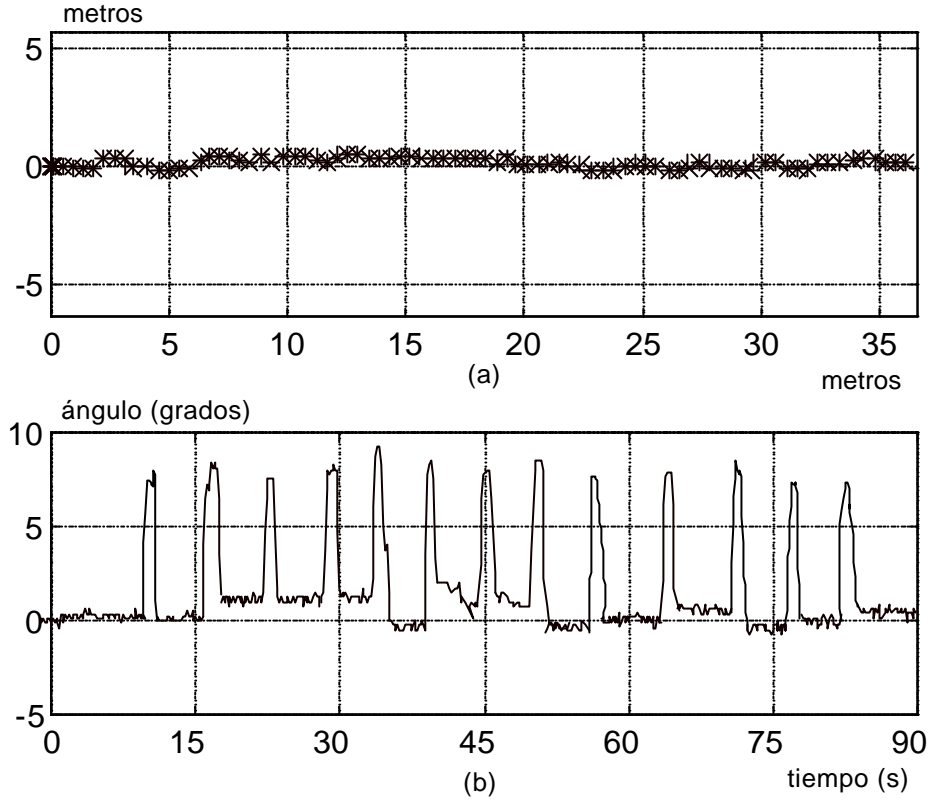


Figura 5.6: Corrección de los errores sistemáticos: a) Camino recorrido mediante conducción manual medido con el GPS centimétrico, b) Ángulo de giro ordenado al volante

15 experimentos, la posición final alcanzada por el robot al recorrer, conducido manualmente, un camino recto de $dS = 100$ m. estimada por la odometría con la posición del vehículo obtenida por el GPS de precisión centimétrica y el de precisión submétrica, cuando se han corregido los errores sistemáticos mediante el envío de consignas de giro del volante. Al diferenciar posiciones odométricas y GPS, debe realizarse el paso de coordenadas cartesianas dadas por la odometría a proyecciones UTM de las medidas GPS (apéndice C). La figura 5.7 muestra los errores en la última posición alcanzada por el robot una vez recorridos los 100 m. obtenidos al restar la estimación odométrica con la posición ofrecida por el GPS de precisión submétrica.

Así, para el robot ROJO, las matrices de covarianza Cov_{og} de la odometría obtenidas al tomar como referencia el GPS centimétrico y submétrico valen, respectivamente:

$$Cov_{og} = \begin{pmatrix} 0.1024 & 0.0001 & 0.00009 \\ 0.00011 & 0.2704 & 0.0001 \\ 0.00095 & 0.0001 & 0.001 \end{pmatrix} \quad (5.70)$$

$$Cov_{og} = \begin{pmatrix} 0.1130 & 0.00012 & 0.00012 \\ 0.00015 & 0.2902 & 0.0001 \\ 0.0009 & 0.00012 & 0.0014 \end{pmatrix} \quad (5.71)$$

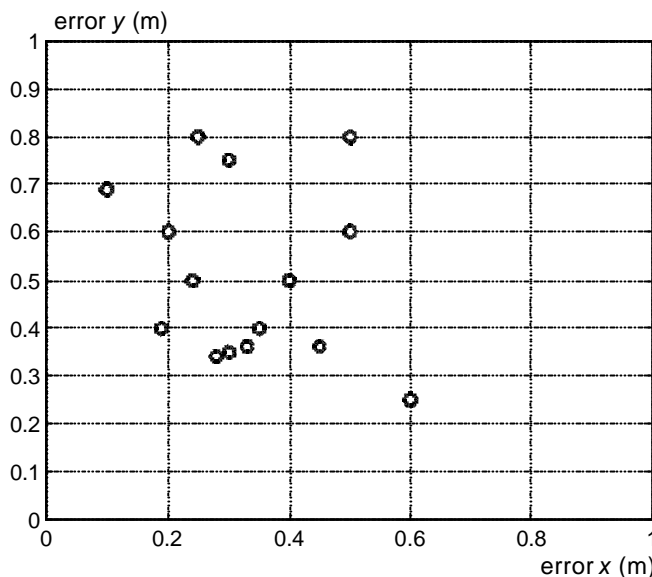


Figura 5.7: Errores aleatorios

Pero la incertidumbre en la posición estimada con los sensores odométricos, esto es, la matriz de covarianza, crece a medida que el vehículo se mueve. Los errores odométricos aumentan cada vez que se calcula la posición del robot, ya que a la incertidumbre heredada de la anterior posición estimada se añaden los errores cometidos en el cálculo de la última posición del vehículo. Por ello, la matriz de covarianza será distinta según el instante de tiempo (distancia que halla recorrido el vehículo), en que se calcule. Se trata de estudiar cómo se propaga esta incertidumbre en los sensores odométricos.

Así, la matriz de covarianza odométrica en cada instante t , $Cov_{op}(t)$, obtenida al propagar la incertidumbre desde una posición de partida, puede calcularse a partir de la matriz de covarianza obtenida experimentalmente Cov_{og} , ecuación (5.70) o ecuación (5.71), haciendo las siguientes suposiciones (figura 5.8):

- La distancia d_s recorrida por el vehículo entre dos posiciones estimadas consecutivas es lo suficientemente pequeña, de forma que se considera que el robot móvil se mueve en línea recta entre dos posiciones estimadas consecutivas. Esta suposición es cierta para vehículos que como el tractor ROJO se muevan a velocidades pequeñas y que cuenten con un reducido periodo de muestreo.
- El sistema de posicionamiento mediante medidas internas se halla bien calibrado, de forma que los errores se encuentren no correlacionados consigo mismos, esto es, estén afectados por ruido blanco. Si no existe correlación entre las componentes del error, el coeficiente de correlación ρ_i vale cero. Por tanto, la matriz de covarianza $Cov_{op}(t)$ es diagonal⁴.

⁴Obsérvese que la matriz Cov_{og} obtenida experimentalmente es prácticamente diagonal por haberse corregido

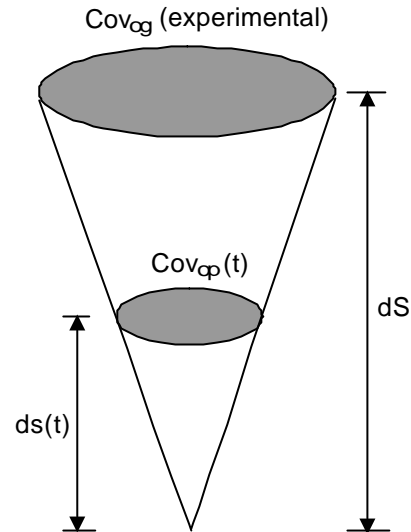


Figura 5.8: Propagación lineal de la incertidumbre mediante sensores internos

De esta forma, conocida de forma experimental la matriz Cov_{og} y la distancia recorrida por el vehículo dS correspondiente a esa matriz Cov_{og} ($dS = 100$ m.), la matriz de covarianza $Cov_{op}(t)$ en el instante t cuando el robot ha recorrido una distancia estimada $ds(t)$ vale [Martínez 94] [Pozo-Ruz 96]:

$$Cov_{op}(t) = Cov_{og} \frac{ds(t)}{dS} \quad (5.72)$$

5.4.2 Matriz de covarianza y caracterización del error del GPS

El sistema GPS, a diferencia de los odómetros, es un sistema de posicionamiento global. Es-to es, la incertidumbre en la posición no crece con el movimiento del vehículo, sino que se mantiene siempre dentro de unas cotas determinadas, en función de la máxima precisión que puede alcanzar el receptor.

Para el cálculo de la matriz de covarianza del receptor GPS 3100LR12 a bordo del robot, definida como la esperanza matemática de los errores de posición (coordenadas Norte y Este y orientación) al cuadrado, se realizan las siguientes suposiciones:

- Los errores en el cálculo de la orientación y coordenadas en el plano están desacoplados, ya que el receptor 3100LR12 emplea técnicas distintas para hallar ambos valores⁵ [Ashtech 96a].
- La incertidumbre es la misma para cada nueva medida GPS independientemente del

los errores sistemáticos.

⁵El cálculo de la orientación se basa en el efecto Doppler.

número de satélites, esto es, en el cálculo estadístico no se va a penalizar aquellas estimaciones que hayan sido obtenidas con un número menor de satélites. No se considerarán, sin embargo, las posibles medidas que no posean corrección diferencial.

Así, para el cálculo del menor 2×2 de la matriz de covarianza del receptor GPS 3100LR12, correspondiente a las posiciones en el plano, se ha registrado esta información durante un periodo de 24 horas, con el receptor GPS fijo en una posición determinada. La media del registro total de medidas se ha considerado como el valor real de la posición. Por tanto, los errores han sido obtenidos al restar a cada una de las medidas el valor medio calculado. La figura 5.9 muestra los errores en las medidas GPS en coordenadas Este y Norte.

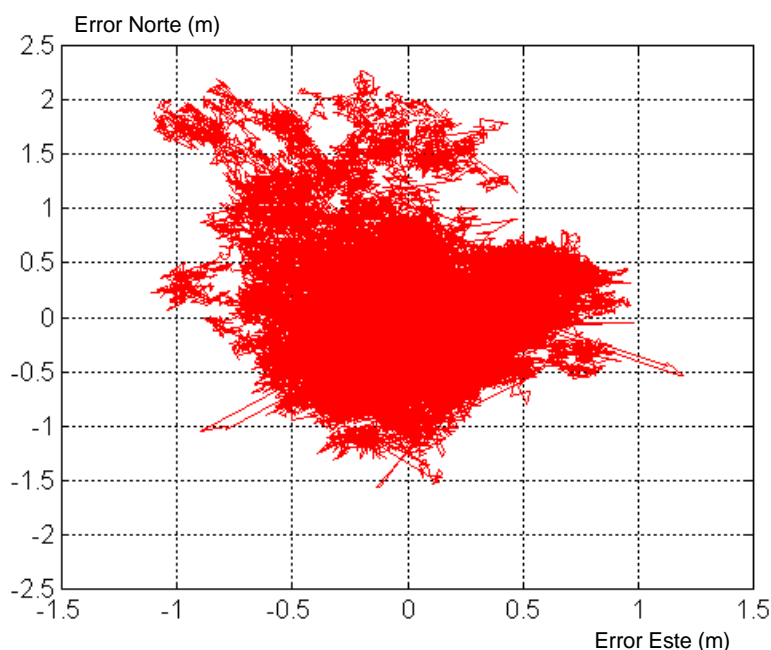


Figura 5.9: Errores en coordenadas Este y Norte para el receptor 3100LR12 con corrección Omnistar

Su matriz de covarianza vale:

$$Cov_{GPS_{pos}} = \begin{pmatrix} 0.1062 & -0.0249 \\ -0.0249 & 0.2716 \end{pmatrix} \quad (5.73)$$

El GPS 3100LR12 proporciona en la trama *POS* (apéndice A) una medida de la orientación del vehículo expresada en grados. Así, para obtener los errores en la orientación que permita completar la matriz de covarianza del GPS, se movió al tractor siguiendo una línea recta y se registró la orientación obtenida en cada momento. La matriz de covarianza del error de orientación por GPS obtenido como la desviación de las estimaciones del GPS respecto a los

cero grados esperados, vale:

$$Cov_{GPS_{ori}} = 16.848 \quad (5.74)$$

Al estar los errores de posición y orientación desacoplados entre sí, la matriz de covarianza obtenida a partir de los resultados experimentales, ecuaciones (5.73) y (5.74), para el receptor 3100LR12 con corrección Ominstar vale:

$$Cov_{GPS} = \begin{pmatrix} 0.1062 & -0.0249 & 0 \\ -0.0249 & 0.2716 & 0 \\ 0 & 0 & 16.848 \end{pmatrix} \quad (5.75)$$

Una vez obtenida la matriz de covarianza de las estimaciones GPS, se procede a continuación a conocer la naturaleza del ruido asociado a estas estimaciones, esto es, si se trata de un ruido blanco o de un ruido coloreado o autocorrelacionado.

En un proceso aleatorio, la función de autocorrelación R_t indica cómo se encuentra correlacionada cada componente de la variable aleatoria consigo misma en dos instantes de tiempo diferentes. Así, para determinar si el ruido que afecta a las medidas realizadas por el receptor GPS es blanco o coloreado, se han calculado las funciones de autocorrelación, con un desplazamiento o desfase $k = 360$, equivalente a seis minutos, sobre la serie temporal de errores de latitud y longitud expresados en proyecciones UTM [Pozo-Ruz 98c] y orientación expresada en grados. Las figuras 5.10a, 5.10b y 5.10c representan de forma gráfica las funciones de autocorrelación respecto al tiempo de las coordenadas Este, Norte y orientación respectivamente para el receptor GPS 3100LR12.

Si el ruido es blanco o no autocorrelacionado, la función de autocorrelación tendrá un valor distinto de cero sólo en el instante inicial y valdrá cero cuando el tiempo tiende a infinito, esto es, no existe relación entre el error en un instante con el error en otros instantes de la secuencia. De forma gráfica, la función de autocorrelación en caso de ruido blanco presentaría un pico en el instante inicial y caería rápidamente a cero. Este comportamiento es el que se observa en la función de autocorrelación de la orientación (figura 5.10c), no así en las funciones de autocorrelación de los errores en longitud y latitud (figuras 5.10a y 5.10b, respectivamente). Se deduce así que tanto la coordenada Norte como la coordenada Este se encuentran correlacionadas consigo mismas, es decir, están afectadas por ruido coloreado, mientras que los errores de orientación poseen un ruido considerado blanco. Según la ecuación (5.61), el ruido que afecta a las medidas GPS puede descomponerse entonces en su componente coloreada y blanca:

$$e_{GPS}(t) = \text{ruido coloreado} + \text{ruido blanco} = Cov_{colorGPS} e_{GPS}(t-1) + e_b \quad (5.76)$$

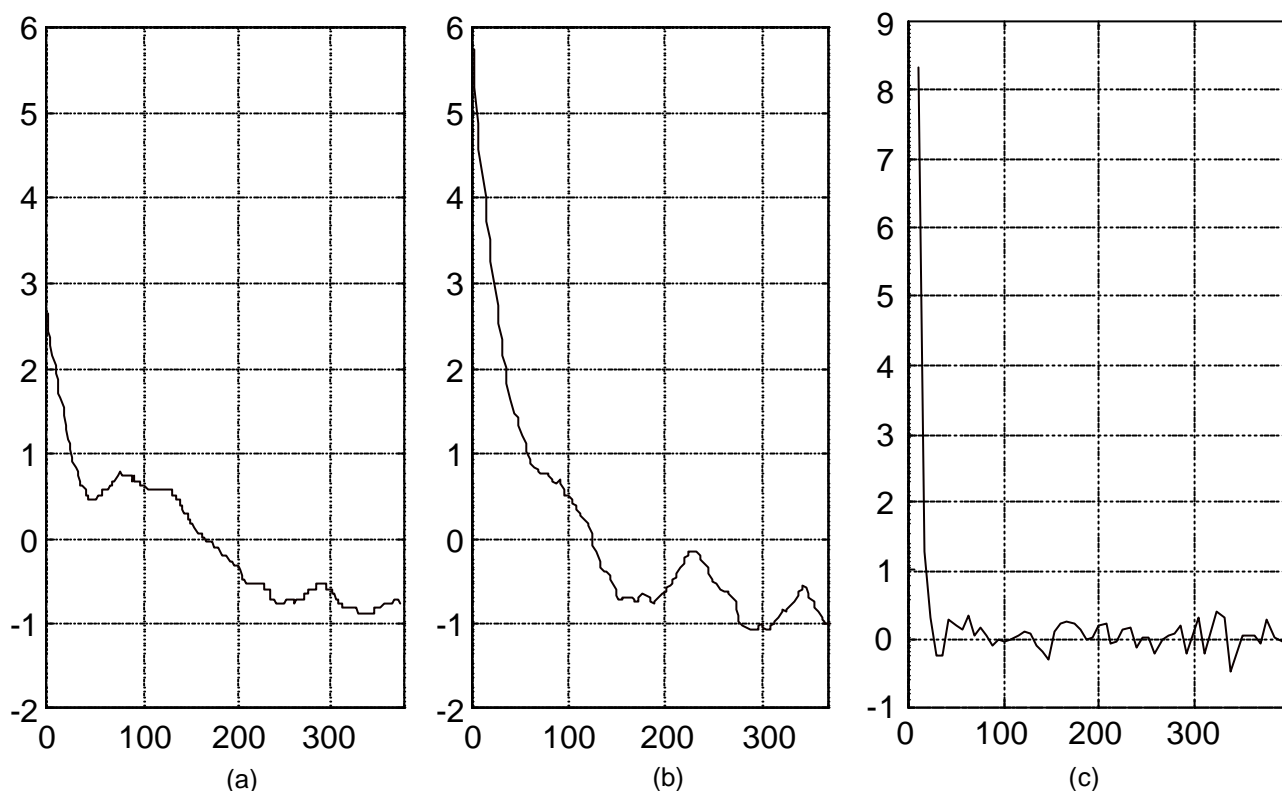


Figura 5.10: Función de autocorrelación para el GPS diferencial con sistema Omnistar: a) Coordenada Este, b) Coordenada Norte, c) Orientación

En esta expresión, $Cov_{colorGPS}$ es una matriz constante que pondera el ruido desfasado en el tiempo y que se obtiene mediante estimación de mínimos cuadrados a partir de las errores en las estimaciones GPS [Pozo-Ruz 00b] obtenidos al restar de cada estimación en valor medio del conjunto de datos registrados, y e_b representa la componente de ruido blanco cuya matriz de covarianza $Cov_{blancoGPS}$, obtenida por la expresión (5.62), es también constante.

Los valores obtenidos para las matrices $Cov_{colorGPS}$ y $Cov_{blancoGPS}$ son los siguientes:

$$Cov_{colorGPS} = \begin{pmatrix} 0.9928 & -0.0005 & 0 \\ -0.0005 & 0.9947 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.77)$$

$$Cov_{blancoGPS} = \begin{pmatrix} 0.0015 & -0.0000045 & 0 \\ -0.0000045 & 0.0027 & 0 \\ 0 & 0 & 16.848 \end{pmatrix} \quad (5.78)$$

Obsérvese que los valores de la diagonal principal del menor 2×2 de la matriz $Cov_{colorGPS}$ son prácticamente iguales a la unidad, corroborando la dependencia de los errores en las medidas de latitud y longitud calculadas por el GPS con las obtenidas en el instante anterior.

5.5 Algoritmo de fusión sensorial particularizado al robot ROJO

Tras deducir la existencia de ruido blanco en las medidas odométricas una vez corregidos los errores sistemáticos y la existencia de ruido coloreado en las medidas de las coordenadas Este y Norte obtenidas por GPS, se procede a particularizar el proceso de fusión formulado en la sección 5.3 al sistema sensorial específico del robot tractor ROJO [Pozo-Ruz 01b]: odometría como medidas internas y un receptor GPS diferencial como sensor externo, donde el odómetro hace el papel de *sensor1* y el GPS de *sensor2*.

Para la particularización del proceso de fusión desarrollado al sistema sensorial del robot ROJO, se representa en primer lugar la posición estimada por cada sensor y la incertidumbre asociada a dicha estimación mediante el modelo de las transformaciones aproximadas: $T = \{\widehat{Loc}, Cov\}$ (figura 5.1). Así, las transformaciones aproximadas correspondientes a la odometría y al GPS se expresan como $T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\}$ y $T_{GPS}(t) = \{\widehat{Loc}_{GPS}(t), Cov_{GPS}(t)\}$, respectivamente. Nótese que ambas transformaciones están referidas al sistema de referencia global.

En el caso del GPS, al ser un sistema de posicionamiento global, la posición obtenida en cada instante t viene dada respecto al sistema global o universal. Sin embargo, los sensores odométricos son sensores relativos, esto es, se fija una posición inicial o de partida en el instante $(t - 1)$, $\widehat{Loc}_p(t - 1) = (\widehat{x}_p(t - 1), \widehat{y}_p(t - 1), \widehat{\phi}_p(t - 1))^T$ con respecto a un sistema de referencia global representada por la transformación (figura 5.11):

$$T_p(t - 1) = \{\widehat{Loc}_p(t - 1), Cov_p(t - 1)\} \quad (5.79)$$

y después de realizar en el instante siguiente t un desplazamiento partiendo desde esta posición se obtiene la estimación de la localización del vehículo mediante el odómetro $Loc_{op}(t) = (\widehat{x}_{op}(t), \widehat{y}_{op}(t), \widehat{\phi}_{op}(t))^T$ referida al sistema de referencia local del robot, así como la incertidumbre asociada a dicha estimación $Cov_{op}(t)$, esto es, la transformación aproximada (figura 5.11):

$$T_{op}(t) = \{\widehat{Loc}_{op}(t), Cov_{op}(t)\} \quad (5.80)$$

Se ha de obtener entonces esta posición $\widehat{Loc}_{op}(t)$ expresada en el sistema de referencia global, esto es, $\widehat{Loc}_{og} = (\widehat{x}_{og}(t), \widehat{y}_{og}(t), \widehat{\phi}_{og}(t))^T$, así como su matriz de covarianza o incertidumbre en la estimación, $Cov_{og}(t)$, en otras palabras, la transformación aproximada $T_{og}(t)$ (figura 5.11):

$$T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\} \quad (5.81)$$

Así, por la figura 5.11, la posición $Loc_{og}(t) = (x_{og}(t), y_{og}(t), \phi_{og}(t))^T$, se obtiene al realizar un cambio de sistemas de referencia:

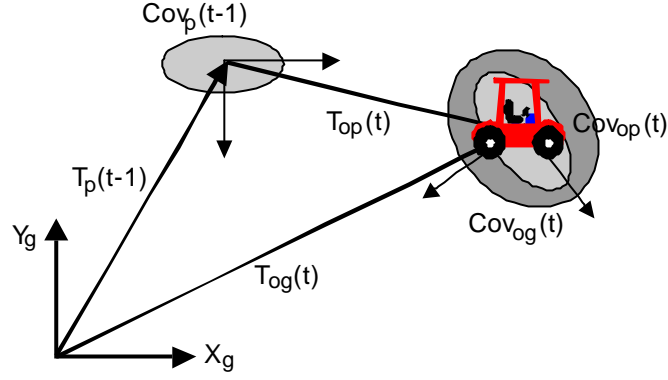


Figura 5.11: Composición de transformaciones aproximadas

$$\begin{aligned}
 x_{og}(t) &= x_p(t-1) + x_{op}(t) \cos(\phi_p(t-1)) - y_{op}(t) \sin(\phi_p(t-1)) \\
 y_{og}(t) &= y_p(t-1) + x_{op}(t) \sin(\phi_p(t-1)) + y_{op}(t) \cos(\phi_p(t-1)) \\
 \phi_{og}(t) &= \phi_p(t-1) + \phi_{op}(t)
 \end{aligned} \tag{5.82}$$

Para calcular la transformación aproximada $T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\}$, que representa la mejor estimación de la posición $Loc_{og}(t)$ procedente del desplazamiento del vehículo relativo a una posición de partida y representada en el sistema de referencia global, se considerará como aproximación los dos primeros términos del desarrollo en serie de potencias de las ecuaciones definidas en (5.82) centradas en los valores medios o estimados de $Loc_p(t-1)$ y $Loc_{op}(t)$, esto es, $\widehat{Loc}_p(t-1)$ y $\widehat{Loc}_{op}(t)$:

$$\begin{aligned}
 x_{og}(t) &\approx \widehat{x}_{og}(t) + \left(\begin{array}{cccccc} \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \end{array} \right) \Big|_{\widehat{Loc}_p(t-1), \widehat{Loc}_{op}(t)} \\
 &\quad \left(\begin{array}{c} e_p(t-1)_{3x1} \\ e_{op}(t)_{3x1} \end{array} \right) \\
 y_{og}(t) &\approx \widehat{y}_{og}(t) + \left(\begin{array}{cccccc} \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \end{array} \right) \Big|_{\widehat{Loc}_p(t-1), \widehat{Loc}_{op}(t)} \\
 &\quad \left(\begin{array}{c} e_p(t-1)_{3x1} \\ e_{op}(t)_{3x1} \end{array} \right) \\
 \phi_{og}(t) &\approx \widehat{\phi}_{og}(t) + \left(\begin{array}{cccccc} \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \end{array} \right) \Big|_{\widehat{Loc}_p(t-1), \widehat{Loc}_{op}(t)} \\
 &\quad \left(\begin{array}{c} e_p(t-1)_{3x1} \\ e_{op}(t)_{3x1} \end{array} \right)
 \end{aligned} \tag{5.83}$$

siendo $e_p(t-1)$ y $e_{op}(t)$ los errores asociados a las estimaciones $\widehat{Loc}_p(t-1)$ y $\widehat{Loc}_{op}(t)$ respecti-

vamente:

$$e_p(t-1) = Loc_p(t-1) - \widehat{Loc}_p(t-1) = \begin{pmatrix} x_p(t-1) - \widehat{x}_p(t-1) \\ y_p(t-1) - \widehat{y}_p(t-1) \\ \phi_p(t-1) - \widehat{\phi}_p(t-1) \end{pmatrix} \quad (5.84)$$

$$e_{op}(t) = Loc_{op}(t) - \widehat{Loc}_{op}(t) = \begin{pmatrix} x_{op}(t) - \widehat{x}_{op}(t) \\ y_{op}(t) - \widehat{y}_{op}(t) \\ \phi_{op}(t) - \widehat{\phi}_{op}(t) \end{pmatrix} \quad (5.85)$$

El primer término del desarrollo en series de potencias presentado en (5.83) representa la mejor estimación de la posición del vehículo $\widehat{Loc}_{og}(t) = (\widehat{x}_{og}(t), \widehat{y}_{og}(t), \widehat{\phi}_{og}(t))^T$, definida como el valor medio de las ecuaciones (5.82):

$$\begin{aligned} \widehat{x}_{og}(t) &= \widehat{x}_p(t-1) + \widehat{x}_{op}(t) \cos(\widehat{\phi}_p(t-1)) - \widehat{y}_{op}(t) \sin(\widehat{\phi}_p(t-1)) \\ \widehat{y}_{og}(t) &= \widehat{y}_p(t-1) + \widehat{x}_{op}(t) \sin(\widehat{\phi}_p(t-1)) + \widehat{y}_{op}(t) \cos(\widehat{\phi}_p(t-1)) \\ \widehat{\phi}_{og}(t) &= \widehat{\phi}_p(t-1) + \widehat{\phi}_{op}(t) \end{aligned} \quad (5.86)$$

Por tanto, el error $e_{og}(t)$ cometido en la estimación de la posición obtenida por odometría resulta de restar las ecuaciones (5.83) y (5.86), que expresado matricialmente vale:

$$\begin{aligned} e_{og}(t) = Loc_{og}(t) - \widehat{Loc}_{og}(t) &= \begin{pmatrix} x_{og}(t) - \widehat{x}_{og}(t) \\ y_{og}(t) - \widehat{y}_{og}(t) \\ \phi_{og}(t) - \widehat{\phi}_{og}(t) \end{pmatrix} = \\ & \left(\begin{array}{cccccc} \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \\ \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \\ \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \end{array} \right) \Bigg|_{\widehat{Loc}_p(t-1), \widehat{Loc}_{op}(t)} \\ & \begin{pmatrix} x_p(t-1) - \widehat{x}_p(t-1) \\ y_p(t-1) - \widehat{y}_p(t-1) \\ \phi_p(t-1) - \widehat{\phi}_p(t-1) \\ x_{op}(t) - \widehat{x}_{op}(t) \\ y_{op}(t) - \widehat{y}_{op}(t) \\ \phi_{op}(t) - \widehat{\phi}_{op}(t) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.87)$$

donde J es la matriz jacobiana:

$$\begin{aligned}
J &= \left(\begin{array}{cccccc} \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial x_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \\ \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial y_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \\ \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial x_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial y_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial \phi_p(t-1)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial x_{op}(t)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial y_{op}(t)} & \frac{\partial \phi_{og}(t)}{\partial \phi_{op}(t)} \end{array} \right) \Big|_{\widehat{Loc}_p(t-1), \widehat{Loc}_{op}(t)} \\
&= \left(\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & -\sin(\widehat{\phi}_p) \widehat{x}_{op} - \cos(\widehat{\phi}_p) \widehat{y}_{op} & \cos(\widehat{\phi}_p) & -\sin(\widehat{\phi}_p) & 0 \\ 0 & 1 & \cos(\widehat{\phi}_p) \widehat{x}_{op} - \sin(\widehat{\phi}_p) \widehat{y}_{op} & \sin(\widehat{\phi}_p) & \cos(\widehat{\phi}_{op}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (5.88)
\end{aligned}$$

Por tanto, el error $e_{og}(t)$ cometido al estimar la posición del vehículo a través de sensores odométricos vale:

$$e_{og}(t) = J \cdot \left(\begin{array}{c} x_p(t-1) - \widehat{x}_p(t-1) \\ y_p(t-1) - \widehat{y}_p(t-1) \\ \phi_p(t-1) - \widehat{\phi}_p(t-1) \\ x_{op}(t) - \widehat{x}_{op}(t) \\ y_{op}(t) - \widehat{y}_{op}(t) \\ \phi_{op}(t) - \widehat{\phi}_{op}(t) \end{array} \right) = J \cdot \left(\begin{array}{c} e_p(t-1) \\ e_{op}(t) \end{array} \right) \quad (5.89)$$

Una vez obtenida la mejor estimación de la posición del vehículo por odometría $\widehat{Loc}_{og}(t)$, ecuación (5.86), y el error cometido en dicha estimación $e_{og}(t)$, ecuación (5.89), para completar la transformación aproximada $T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\}$ queda por calcular la matriz de covarianza $Cov_{og}(t)$ que representa la incertidumbre en la estimación. Así, esta matriz de covarianza $Cov_{og}(t)$ en cada instante t obtenida por propagación de la incertidumbre en las estimaciones odométricas se obtiene al realizar la esperanza matemática de los errores $e_{og}(t)$, ecuación (5.89), al cuadrado:

$$\begin{aligned}
Cov_{og}(t) &= E \left[\left[J \left(\begin{array}{c} e_p(t-1) \\ e_{op}(t) \end{array} \right) \right] \left[J \left(\begin{array}{c} e_p(t-1) \\ e_{op}(t) \end{array} \right) \right]^T \right] = \\
&J \cdot E \left[\left(\begin{array}{c} e_p(t-1) \\ e_{op}(t) \end{array} \right) \left(\begin{array}{cc} e_p(t-1) & e_{op}(t) \end{array} \right) \right] \cdot J^T \quad (5.90)
\end{aligned}$$

Si se considera que las transformaciones aproximadas $T_p(t-1)$ y $T_{op}(t)$ son independientes entre sí, esto es, el ruido $e_p(t-1)$ y $e_{op}(t)$ se encuentran no correlacionados, la ecuación (5.90) puede expresarse como:

$$Cov_{og}(t) = J \left(\begin{array}{cc} Cov_p(t-1) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & Cov_{op}(t) \end{array} \right) J^T \quad (5.91)$$

Nótese que esta matriz de covarianza $Cov_{og}(t)$ es una matriz diagonal, al haberse corregido los errores sistemáticos del odómetro. En la ecuación (5.91), la matriz de covarianza $Cov_{op}(t)$ se calcula según la ecuación (5.72).

Se ha obtenido así la transformación aproximada $T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\}$ que representa la mejor estimación de la posición del vehículo obtenida por odometría y la incertidumbre asociada a dicha estimación. El desarrollo presentado es válido para sensores relativos como los basados en la odometría del vehículo, esto es, sensores que obtienen la posición del vehículo en el instante actual a partir de la calculada en un instante anterior. En estos sensores, la incertidumbre asociada al cálculo de la posición del robot crece a medida que el vehículo avanza, ya que a la incertidumbre heredada de la anterior posición estimada se añaden los errores cometidos en el cálculo de la última posición del vehículo.

La transformación aproximada $T_{og}(t)$, que representa la mejor estimación del vehículo en el instante t expresada en coordenadas globales, ha sido calculada al componer dos transformaciones aproximadas sucesivas, una que representa la posición de partida del vehículo en el sistema de referencia global en el instante anterior ($t-1$), $T_p(t-1)$, y otra $T_{op}(t)$ que representa la posición que alcanza el vehículo en el instante t respecto a la posición de partida, esto es, respecto al sistema local del vehículo. Por tanto, la mejor estimación de la posición del robot obtenida por odometría $\widehat{Loc}_{og}(t)$, ecuación (5.86), viene indicada en función de $\widehat{Loc}_p(t-1)$ y de $\widehat{Loc}_{op}(t)$, y la incertidumbre asociada a dicha estimación $Cov_{og}(t)$, ecuación (5.91), es el resultado de la propagación de las incertidumbres $Cov_p(t-1)$ y $Cov_{op}(t)$ asociadas a las estimaciones de partida:

$$T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_f(t)\}$$

donde :

$$\widehat{Loc}_{og}(t) = \begin{pmatrix} \widehat{x}_{og}(t) \\ \widehat{y}_{og}(t) \\ \widehat{\phi}_{og}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \widehat{x}_p(t-1) + \widehat{x}_{op}(t) \cos(\widehat{\phi}_p(t-1)) - \widehat{y}_{op}(t) \sin(\widehat{\phi}_p(t-1)) \\ \widehat{y}_p(t-1) + \widehat{x}_{op}(t) \sin(\widehat{\phi}_p(t-1)) + \widehat{y}_{op}(t) \cos(\widehat{\phi}_p(t-1)) \\ \widehat{\phi}_p(t-1) + \widehat{\phi}_{op}(t) \end{pmatrix}$$

$$Cov_{og}(t) = J \cdot \begin{pmatrix} Cov_p(t-1) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & Cov_{op}(t) \end{pmatrix} \cdot J^T$$

Una vez obtenida la transformación aproximada $T_{og}(t) = \{\widehat{Loc}_{og}(t), Cov_f(t)\}$ que representa la estimación de la posición odométrica y su incertidumbre asociada, se procede ahora a calcular la transformación aproximada $T_{GPS}(t) = \{\widehat{Loc}_{GPS}(t), Cov_{GPS}(t)\}$ correspondiente al sensor GPS 3100LR a bordo del robot. Al ser el GPS un sistema de posicionamiento global, la posición viene dada en cada instante en este sistema de referencia. Para completar $T_{GPS}(t)$ queda por tanto calcular su matriz de covarianza $Cov_{GPS}(t)$. Como se comprobó en el apartado 5.4.2,

las estimaciones GPS están contaminadas por ruido coloreado o autocorrelacionado, por lo que su error $e_{GPS}(t)$ se descompone en una componente coloreada o autocorrelacionada y en otra componente no autocorrelacionada o blanca, tal como se indicó en la ecuación (5.76):

$$e_{GPS}(t) = Cov_{colorGPS} e_{GPS}(t-1) + e_b$$

Por tanto, la matriz de covarianza $Cov_{GPS}(t)$ vale:

$$\begin{aligned} Cov_{GPS}(t) &= E \left[e_{GPS}(t) e_{GPS}^T(t) \right] \\ &= Cov_{colorGPS} Cov_{GPS}(t-1) Cov_{colorGPS}^T + Cov_{blancoGPS} \end{aligned} \quad (5.92)$$

Obsérvese que la ecuación (5.92) se aplica por primera vez en $t = 1$, siendo $Cov_{GPS}(t = 0)$ la calculada experimentalmente para el receptor GPS 3100LR y cuyo valor viene indicado en la ecuación (5.75). Los valores de $Cov_{colorGPS}$ y $Cov_{blancoGPS}$ para el receptor GPS 3100LR son los indicados en las expresiones (5.77) y (5.78).

Una vez obtenidas las expresiones para las transformaciones aproximadas de las estimaciones odométricas y GPS, se presenta a continuación la forma de obtención de las ecuaciones para la fusión de medidas que permita obtener la mejor estimación de la posición del vehículo. En el caso del sistema sensorial del robot ROJO se tienen medidas contaminadas con error blanco (estimaciones odométricas) y medidas contaminadas con ruido coloreado o autocorrelacionado (estimaciones GPS). Se trata entonces de ver si existe o no existe dependencia o correlación entre las mismas.

Según el modelo de fusión descrito, si las medidas odométricas y GPS fuesen independientes entre sí, la matriz de covarianza $Cov_{ogGPS}(t)$ que representa la correlación entre variables⁶ valdría cero, por lo que la función de probabilidad conjunta vendría dada por la ecuación (5.15). Sin embargo, esto no ocurre así, pues se emplea como punto de partida para la odometría la mejor estimación de la posición obtenida al fusionar la medida odométrica y GPS (figura 5.12). Esto es, el error $e_{og}(t)$ asociado a la medida odométrica en el instante t está correlacionado con el error $e_{GPS}(t-1)$ en el instante anterior, y la matriz $Cov_{ogGPS}(t)$ vale:

$$Cov_{ogGPS}(t) = E \left[e_{og}(t) e_{GPS}^T(t-1) \right] \quad (5.93)$$

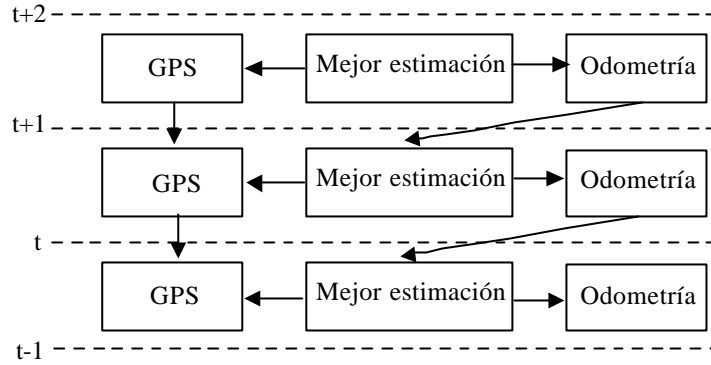


Figura 5.12: Correlación entre las estimaciones odométricas y GPS

Así, la función de probabilidad conjunta viene dada por la expresión (5.21), esto es, la expresión de la función de probabilidad conjunta para medidas correlacionadas entre sí:

$$\begin{aligned}
 P(Loc_f(t)) &= \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{og}(t))^T \tilde{Cov}_{og}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{og}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|\tilde{Cov}_{og}(t)|}} \\
 &\quad \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{GPS}(t))^T Cov_{GPS}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{GPS}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{GPS}(t)|}} \\
 &= \frac{e^{-\frac{1}{2}[(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{og}(t))^T \tilde{Cov}_{og}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \tilde{Loc}_{og}(t)) + (Loc_f(t) - \hat{Loc}_{GPS}(t))^T Cov_{GPS}^{-1}(t)(Loc_f(t) - \hat{Loc}_{GPS}(t))]}}{(2\pi)^3 \sqrt{|\tilde{Cov}_{og}(t)| |Cov_{GPS}(t)|}}
 \end{aligned} \tag{5.94}$$

donde de las ecuaciones (5.18) y (5.19):

$$\tilde{Loc}_{og}(t) = \hat{Loc}_{og}(t) + Cov_{ogGPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) (\hat{Loc}_f(t) - \hat{Loc}_{GPS}(t)) \tag{5.95}$$

$$\tilde{Cov}_{og}(t) = Cov_{og}(t) - Cov_{ogGPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) Cov_{ogGPS}^T(t) \tag{5.96}$$

Por tanto, según el desarrollo de fusión descrito, las medidas proporcionadas por los sensores a bordo del robot ROJO se corresponden con el denominado *Caso 4* (apartado 5.3.4), esto es, medidas con errores correlacionados entre sí y donde el error que afecta a una de ellas se encuentra además correlacionado consigo mismo. Así, las ecuaciones que permiten obtener la transformación aproximada $T_f(t) = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$ que representa la mejor estimación $\hat{Loc}_f(t)$ de la posición del vehículo y la incertidumbre $Cov_f(t)$ asociada a dicha estimación a partir de las transformaciones aproximadas de la odometría $T_{og}(t) = \{\hat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\}$,

⁶La matriz $Cov_{ogGPS}(t)$ hace el papel de la matriz $Cov_{1g2g}(t)$ en los desarrollos presentados en la sección 5.3.

ecuaciones (5.86) y (5.91), y del GPS $T_{GPS}(t) = \{\hat{Loc}_{GPS}(t), Cov_{GPS}(t)\}$, (ecuación (5.92), para la matriz de covarianza), vienen dadas, respectivamente, por las ecuaciones (5.67) y (5.69) deducidas en el apartado 5.3.4. Así, para el sistema sensorial del robot, la mejor estimación $\hat{Loc}_f(t)$ se obtiene como:

$$\hat{Loc}_f = \hat{Loc}_{og}(t) + G(t)(\hat{Loc}_{GPS}(t) - \hat{Loc}_{og}(t)) \quad (5.97)$$

y la incertidumbre $Cov_f(t)$ asociada a dicha estimación vale:

$$\begin{aligned} Cov_f(t) = & Cov_{og}(t) + Cov_{ogGPS}(t)G^T(t) - Cov_{og}(t)G^T + G(t)Cov_{ogGPS}^T(t) \\ & + G(t)Cov_{GPS}(t)G^T(t) - G(t)Cov_{ogGPS}^T(t)G^T(t) - G(t)Cov_{og}(t) \\ & - G(t)Cov_{ogGPS}(t)G^T(t) + G(t)Cov_{og}(t)G^T(t) \end{aligned} \quad (5.98)$$

El término de ganancia $G(t)$ de las expresiones (5.97) y (5.98) viene dado por la ecuación (5.68):

$$\begin{aligned} G(t) = & I - \left[(I - Cov_{ogGPS}(t)Cov_{GPS}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{og}^{-1}(t)(I - Cov_{ogGPS}(t)Cov_{GPS}^{-1}(t)) + Cov_{GPS}^{-1}(t) \right]^{-1} \\ & (I - Cov_{ogGPS}(t)Cov_{GPS}^{-1}(t))\tilde{Cov}_{og}^{-1}(t) \end{aligned} \quad (5.99)$$

Nótese que la expresión de la ganancia $G(t)$, ecuación (5.99), muestra tanto la dependencia entre los errores de las estimaciones odométricas y GPS, matriz $Cov_{ogGPS}(t)$, ecuación (5.93), como la existencia de ruido coloreado o autocorrelacionado en las estimaciones GPS, matriz $Cov_{GPS}(t)$, ecuación (5.92).

De acuerdo con el modelo de fusión aquí propuesto, la transformación aproximada $T_f(t) = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$, ecuaciones (5.97) y (5.98), que representa en cada instante t la mejor estimación de la posición del vehículo y la incertidumbre asociada a dicha estimación obtenida por el método de fusión de las medidas GPS y odométricas, se convierte en la nueva transformación aproximada inicial $T_p(t)$ para el cálculo de la posición en el instante $(t + 1)$ y así sucesivamente (figura 5.11).

5.6 Diseño del agente VE A PUNTO

Para validar el algoritmo de posicionamiento mediante fusión sensorial descrito, hemos desarrollado, dentro de la arquitectura AMARA (figura 4.13), el agente de comportamiento VE A PUNTO.

Este agente de comportamiento es el encargado de llevar al tractor, de forma autónoma y a partir de la información proporcionada por el odómetro y el GPS diferencial, a un punto especificado por el operario de forma remota [Pozo-Ruz 01b] [Garcia-Alegre 01].

El agente de comportamiento VE A PUNTO se ha implementado como un programa CLIENTE perteneciente al nivel medio de la arquitectura. Hace uso, por tanto, de las tareas implementadas en el programa servidor y que constituyen el nivel inferior de la arquitectura: agentes de comportamiento básicos HACIA ADELANTE, PARA, HACIA ATRÁS, GIRO HACIA LA DERECHA, GIRO HACIA LA IZQUIERDA y lectura de sensores. De esta forma, a partir de la información proporcionada por los sensores, el robot calcula su posición mediante fusión sensorial, y dependiendo de la misma, ordena al control de bajo nivel del vehículo una secuencia de órdenes de movimiento, esto es, mensajes de puesta en marcha del tractor, control del giro del volante y parada del vehículo, que permita alcanzar el punto deseado.

Como todo programa CLIENTE, la comunicación con el servidor para tales tareas se realiza mediante *WinSockets*, empleando para la petición y recepción de órdenes e información el conjunto de mensajes definidos en la arquitectura AMARA (apéndice D).

El escenario de experimentación para el movimiento del robot en el desarrollo del agente de comportamiento VE A PUNTO es el denominado ZOCO (*ZOCO, Zona de Conducción automática de vehículos*), situado en el IAI-CSIC (Arganda del Rey, Madrid).

Se presenta en esta sección una descripción detallada del agente VE A PUNTO. Se describe en primer lugar el campo de experimentación ZOCO por donde se mueve el tractor. A continuación, se detalla el cálculo del grafo o camino a seguir por el tractor bajo los criterios de mínimo número de giros y menor distancia entre ambos puntos. Para ello, se describe la obtención de los puntos de inicio y fin de la trayectoria, así como el algoritmo para el seguimiento del camino generado.

5.6.1 Descripción y modelado del campo de experimentación ZOCO

ZOCO está formado por una serie de pistas construidas en el IAI-CSIC para el desarrollo de las tareas de investigación que lleva a cabo el Instituto (figura 5.13).

A cada una de las pistas de ZOCO se las ha bautizado con el nombre de una personalidad del presente o del pasado que ha influido de forma significativa en las investigaciones acerca del control de vehículos autónomos. Las pistas horizontales (figura 5.13) tienen nombres de personajes dedicados a la automatización, mientras que las verticales reciben el nombre de antiguos científicos que diseñaron y crearon instrumentos de navegación.

Estas pistas o calles de ZOCO constituyen el escenario de movimiento para el tractor. Se re-

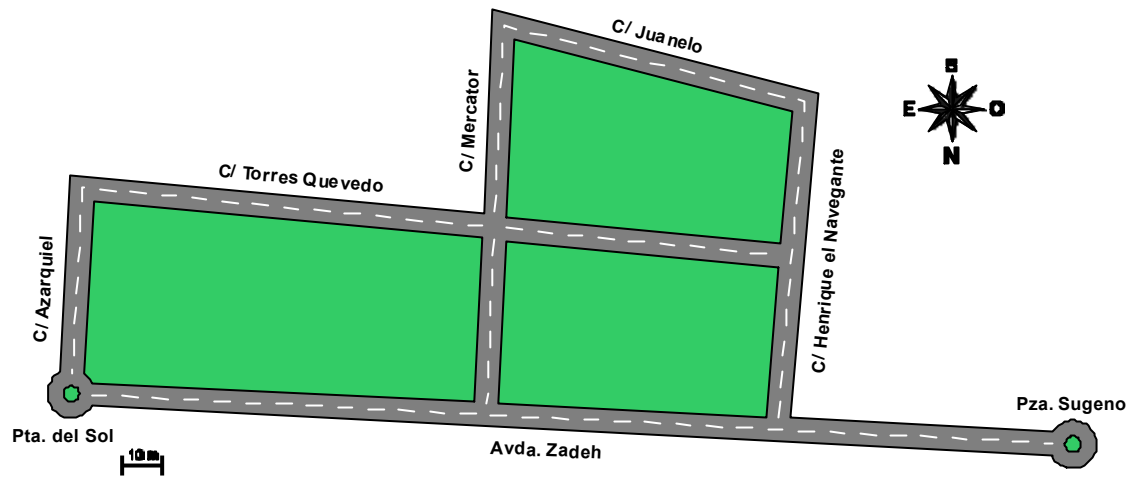


Figura 5.13: ZOCO: Zona de conducción automática de vehículos

quiere, por tanto, representar las diferentes calles de forma que puedan emplearse como caminos de referencia para el robot. Cada una de ellas, cuyo ancho es de 6 m., se define por la ecuación de la recta que pasa por el centro de las mismas. De esta forma, basta con conocer las coordenadas del punto central de intersección entre las pistas (puntos P_i) para obtener la expresión de la recta que define esta calle o pista. Así, P_0 , que se corresponde con el punto central de Plaza Puerta del Sol, y P_3 , que se corresponde con el centro de la Plaza Sugeno, define la recta correspondiente a la Avda. Zadeh (figura 5.14).

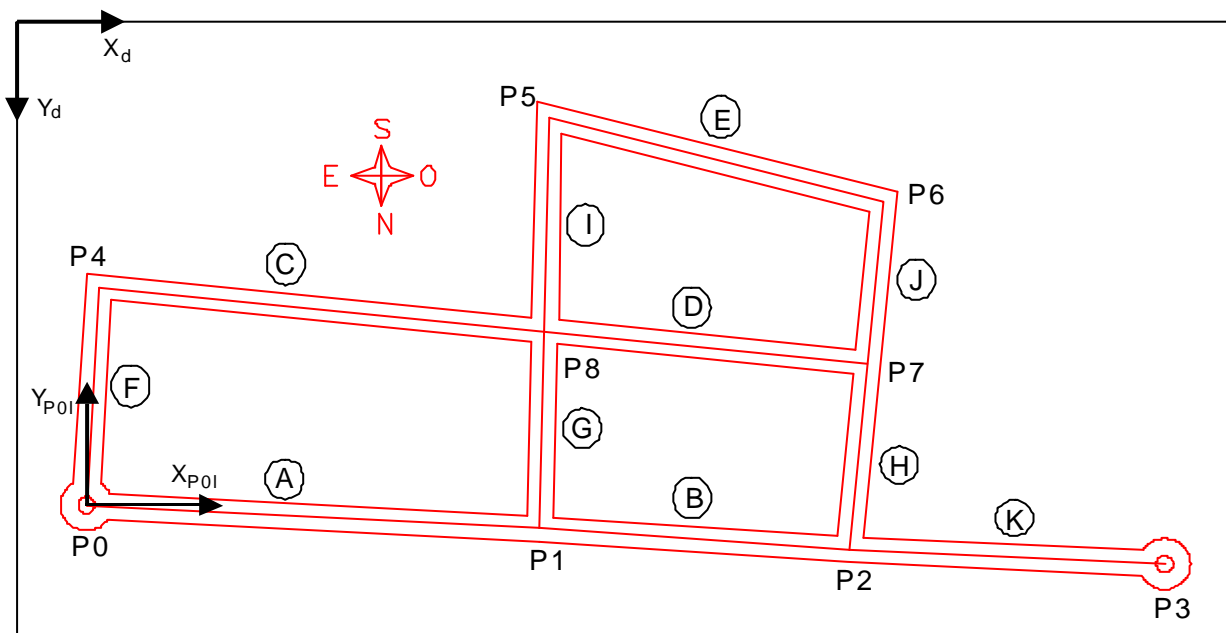


Figura 5.14: Puntos georeferenciados en ZOCO y segmentos

Las coordenadas UTM de cada punto P_i se han obtenido al promediar las medidas registradas durante un minuto por el GPS 3100LR12 de precisión submétrica que forma parte del sistema

sensorial de localización del robot. Tanto las coordenadas UTM de cada vértice de ZOCO como sus coordenadas locales obtenidas al situar el origen de coordenadas en el centro de la rotonda Puerta del Sol (figura 5.14) se muestran en la tabla 5.1.

CALLE		COORDENADAS UTM (m)		COORDENADAS LOCALES (m)	
Nombre	Pto	Coord. E	Coord. N	Coord. X	Coord. Y
Pta. del Sol	P_0	459060.11	4462551.94	0	0
Avda. Zadeh	P_0	459060.11	4462551.94	0	0
	P_3	458808.79	4462564.30	251.32	-12.35
Torres Quevedo	P_4	459057.15	4462499.20	2.95	52.74
	P_7	458877.56	4462517.88	182.54	34.06
Juanelo	P_5	458951.70	4462460.18	108.40	91.76
	P_6	458873.05	4462479.47	187.06	72.47
Azarquiel	P_0	459060.11	4462551.94	0	0
	P_4	459057.15	4462499.20	2.95	52.74
Mercator	P_1	458952.92	4462556.60	107.19	-4.65
	P_5	458951.70	4462460.18	108.40	91.76
Henrique el Navegante	P_2	458881.78	4462560.68	178.32	-8.73
	P_6	458873.05	4462479.47	187.06	72.47
Plaza Sugeno	P_3	458808.79	4462564.30	251.32	-12.35
	P_8	458953.82	4462510	106.28	41.54

Tabla 5.1: Coordenadas UTM y locales de los vértices de ZOCO

Para caracterizar completamente ZOCO se define el concepto de segmento. En este sentido, se denomina segmento al tramo de recta comprendido entre dos puntos P_i , es decir, los distintos cruces entre calles. Así, en ZOCO la calle Avd. Zadeh está compuesta por tres segmentos: el segmento A , comprendido entre los puntos P_0 y P_1 , el segmento B comprendido entre los puntos P_1 y P_2 y el segmento K , que es el tramo de recta situado entre los vértices P_2 y P_3 (figura 5.14).

La caracterización de las pistas de ZOCO por segmentos es necesaria para establecer el grafo de movimiento del vehículo, esto es, los distintos caminos generados por el robot para ir desde su punto inicial o de partida hasta un destino fijado por el usuario.

5.6.2 Cálculo del grafo

Una vez descrito el campo de experimentación por donde se moverá el robot, se procede ahora al diseño del grafo, esto es, a la obtención del camino que debe seguir el tractor ROJO para llegar desde su posición inicial al destino especificado, minimizando el número de giros y la distancia recorrida.

Debido a la difícil maniobrabilidad del vehículo en los seis metros de ancho de cada una de las

pistas de ZOCO, se considerará que el robot se orienta paralelo, en cualquier dirección, a la pista en la que se sitúe y con las ruedas alineadas.

Las entradas al grafo consisten en el segmento correspondiente a la posición inicial del robot y en el segmento correspondiente a su posición final. A partir de esta información, se define el camino óptimo a seguir por el vehículo así como una alternativa al mismo, en función de la orientación inicial del robot. Este camino alternativo es el que seguirá el vehículo cuando se encuentre orientado en sentido opuesto al camino óptimo. Si el robot estuviera dotado de la maniobrabilidad suficiente para girar 180° sin salirse de la pista, este camino alternativo resultaría innecesario.

Para un determinado segmento de inicio y fin, grafo tiene la siguiente estructura:

$$\text{Grafo} = \{N\text{rectas}, \text{recta}_1, X_{utmV_1}, Y_{utmV_1}, \text{Direcc}_1, \text{recta}_2, X_{utmV_2}, Y_{utmV_2}, \text{Direcc}_2, \dots, \text{recta}_n, \text{Direcc}_n\}$$

En primer lugar se indica el número de rectas que componen el camino total o grafo, ya que en caso de que el camino se componga de más de una recta, hay que tener en cuenta la transición o paso entre una y otra. A continuación, se indica la recta a la que pertenece el segmento, identificada por un índice (tabla 5.2), cuya ecuación definirá el camino para el robot. Si el camino está compuesto por más de una recta y la recta no es la última de las que componen el camino, se indican en los campos siguientes las coordenadas del vértice de finalización del segmento, esto es, las coordenadas de la esquina por la que debe girar el robot. Seguidamente se define la dirección, que indica el sentido de movimiento del robot por la calle o segmento. Este parámetro se emplea para el cálculo del punto objetivo en el seguimiento del camino según la estrategia de persecución pura (apartado 5.6.3). La dirección viene indicada con un $0, 1, 2$ ó 3 (tabla 5.3) según si el robot se encuentra en una calle vertical u horizontal y según la orientación inicial del robot⁷ (TRUE o FALSE) (figura 5.15).

Calle	Índice
Avda. Zadeh	0
C/ Torres Quevedo	1
C/ Juanelo	2
C/ Arzarquiel	3
C/ Mercator	4
C/ Henrique el Navegante	5

Tabla 5.2: Campo *Identificación de las calles de ZOCO*

Así, para ir, por ejemplo, del segmento *A* (Avda. Zadeh) al segmento *I* (C/ Mercator) (figura 5.16) el grafo sería el siguiente:

⁷Se considerará siempre al robot orientado paralelo a la pista, en un sentido u otro.

Dirección	Coord. locales	Coord. UTM
0	x decreciente, y creciente	<i>Este</i> creciente, <i>Norte</i> decreciente
1	x creciente, y decreciente	<i>Este</i> decreciente, <i>Norte</i> creciente
2	x creciente, y creciente	<i>Este</i> decreciente, <i>Norte</i> decreciente
3	x decreciente, y decreciente	<i>Este</i> creciente, <i>Norte</i> creciente

Tabla 5.3: Campo *dirección*

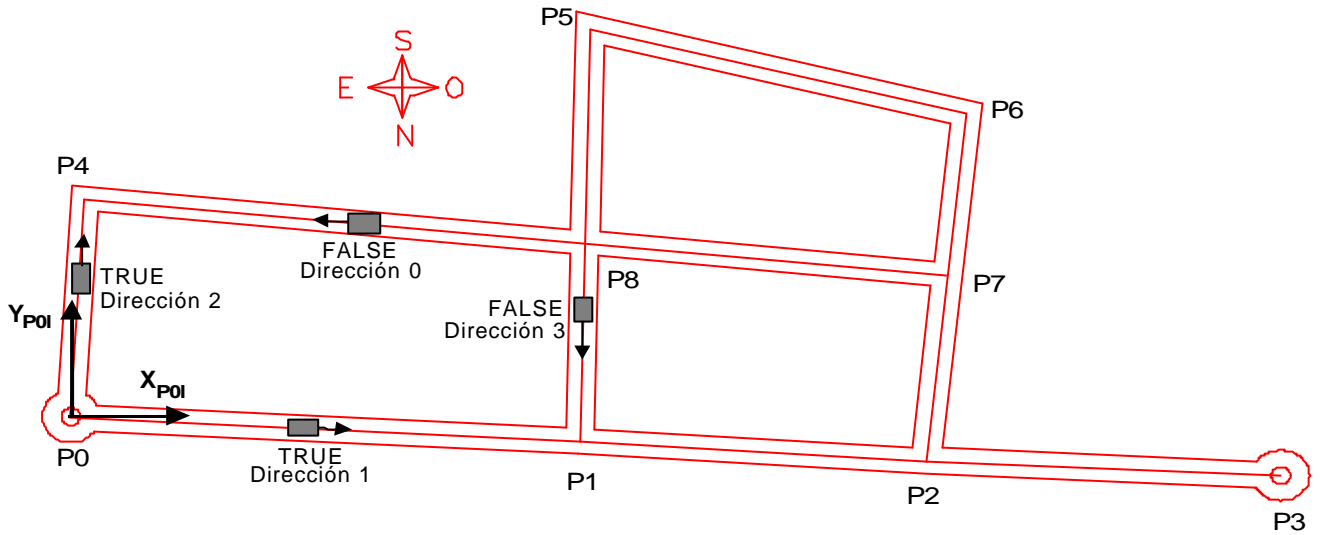


Figura 5.15: Definición de direcciones en el grafo

- Si *TRUE* (figura 5.16a):

– $Grafo = \{2, 0, 458952.92, 4462556.60, 1, 4, 2\}$

- Si *FALSE* (camino alternativo, figura 5.16b):

– $Grafo = \{4, 0, 459060.11, 4462551.94, 1, 3, 459057.15, 4462499.20, 2, 1, 458953.82, 4462510.40, 1, 4, 2\}$

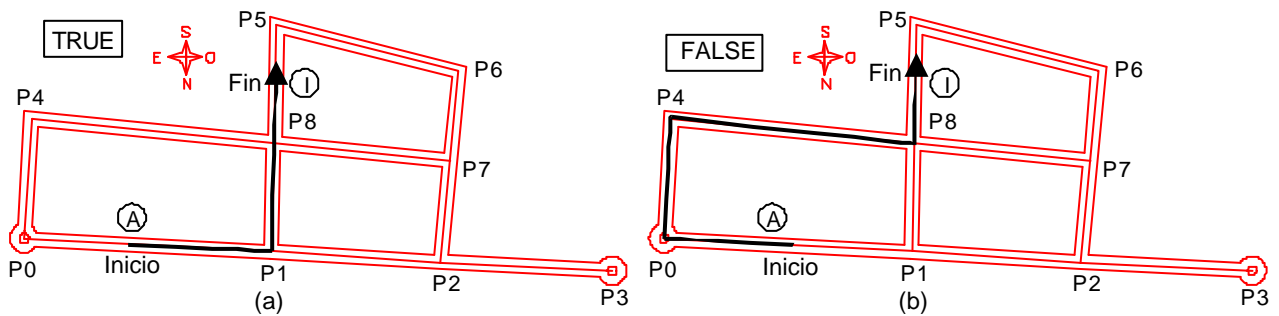


Figura 5.16: Grafo para ir desde el segmento *A* al segmento *I*: a) Camino óptimo, b) Camino alternativo

En el caso de que el punto inicial en el que se encuentra el robot y el punto final especificado por el usuario se sitúen en el mismo segmento, hay que tener en cuenta, además de la orientación inicial del vehículo, la situación relativa entre estos puntos inicial y final. Así, si por ejemplo ambos puntos se encuentran en el segmento A (Avda. Zadeh), el grafo sería el siguiente (figura 5.17):

- Si $ESTE\ FIN < ESTE\ INICIO$:

- Si $TRUE$: (figura 5.17a)

- * $Grafo = \{1, 0, 1\}$

- Si $FALSE$: (figura 5.17b)

- * $Grafo = \{5, 0, 459060.11, 4462551.94, 0, 3, 459057.15, 4462499.20, 2, 1, 458953.82, 4462510.40, 1, 4, 458952.92, 4462556.60, 3, 0, 0\}$

- Si $ESTE\ FIN > ESTE\ INICIO$:

- Si $TRUE$: (figura 5.17c)

- * $Grafo = \{5, 0, 458952.92, 4462556.60, 1, 4, 458953.82, 4462510.40, 2, 1, 459057.15, 4462499.20, 0, 3, 459060.11, 4462551.94, 3, 0, 1\}$

- Si $FALSE$: (figura 5.17d)

- * $Grafo = \{1, 0, 0\}$

Cálculo de la posición inicial

Para el cálculo del punto inicial o de partida del robot ROJO se considerará que se orienta paralelo a la pista y con las ruedas alineadas.

Las coordenadas de la posición inicial del vehículo se obtienen a partir de las medidas obtenidas con el receptor GPS diferencial a bordo del mismo. Para ello, se hace la media de las posiciones registradas por el receptor durante un minuto. Este valor medio es el punto (x, y) de inicio. Para evitar operar con números excesivamente grandes como los proporcionados en coordenadas UTM, se trabajará en coordenadas locales. Para ello, se resta a las posiciones estimadas por el GPS las coordenadas UTM del punto P_0 , esto es, las coordenadas del origen del sistema local de ZOCO, situado en el centro de la Plaza Puerta del Sol (figura 5.14).

Para obtener el segmento de partida (figura 5.14) se calcula primero el vértice más cercano al punto de inicio obtenido⁸. Una vez obtenido el vértice más cercano, son dos las posibles rectas

⁸Las coordenadas locales de cada vértice de ZOCO se muestran en la tabla 5.1.

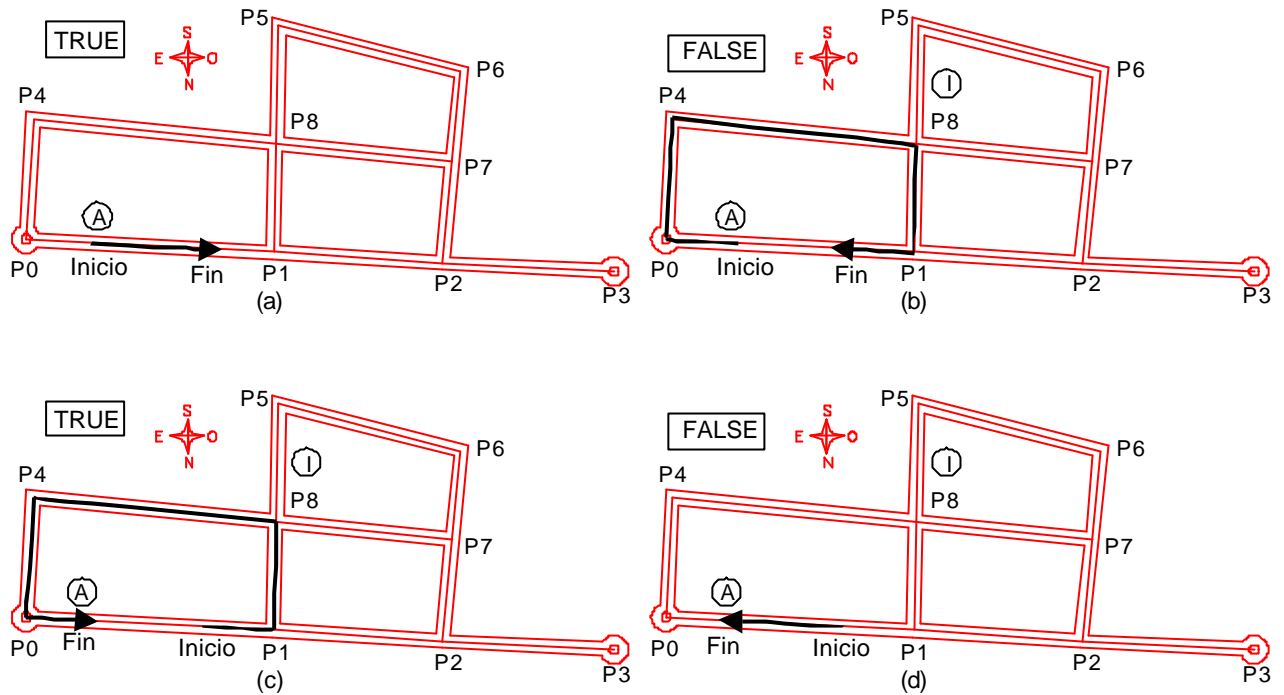


Figura 5.17: Grafo para ir desde el segmento A al segmento A : a) $EsteFin < EsteInicio$ y TRUE, b) $EsteFin < EsteInicio$ y FALSE, c) $EsteFin > EsteInicio$ y TRUE, b) $EsteFin > EsteInicio$ y FALSE

o pistas en las que puede encontrarse el robot y que son aquellas que intersectan en este vértice. Se calcula entonces la distancia entre la posición inicial del vehículo y cada una de estas rectas, cuyas ecuaciones son conocidas al disponer, al menos, de dos puntos pertenecientes a las mismas (vértices expresados en coordenadas locales, tabla 5.1). Conocido el vértice más cercano y el índice indicativo de la recta más cercana (tabla 5.2) se obtiene el segmento que intervendrá en el cálculo del grafo.

Por ejemplo:

- Si el vértice más cercano es P_0 :
 - Si la recta más cercana = Avda. Zadeh (recta 0):
 - * Segmento inicio = A
 - Si la recta más cercana = C/ Azarquiel (recta 3):
 - * Segmento inicio = F

Si en el vértice confluyen más de dos segmentos, como ocurre en los vértices P_1 , P_7 y P_8 , hay que realizar una comparación adicional. Así, por ejemplo:

- Si el vértice más cercano es el punto P_7 :

- Si la recta más cercana = C/ Torres Quevedo (recta 1):
 - * Segmento inicio = D .
- Si la recta más cercana = C/ Henrique el Navegante (recta 5):
 - * Si $distancia(Y_{inicio}, Y_{P6}) > distancia(Y_{P7}, Y_{P6})$:
 - Segmento inicio = H
 - * En caso contrario:
 - Segmento inicio = J

En lo referente al cálculo de la orientación inicial del vehículo, ésta puede estimarse por dos vías diferentes. La primera de ellas permite obtener analíticamente la orientación del vehículo al considerar que éste se sitúa paralelo a la calle donde en ese momento se encuentre. La orientación se corresponde, por tanto, con la dirección del vector que define la calle respecto al Norte. La tabla 5.4 muestra la orientación respecto al Norte de cada una de las pistas de ZOCO.

Calle	Orientación (grados)
Avda. Zadeh	272.81°
Torres Quevedo	275.72°
Juanelo	279.45°
Azarquiel	183.25°
Mercator	181.21°
Henrique el Navegante	185.79°

Tabla 5.4: Orientación de las calles de ZOCO

La segunda forma de obtener la orientación del vehículo es a través de las estimaciones que sobre esta componente proporciona el GPS en la trama *POS* (apéndice A). Para ello, el robot comienza a avanzar en línea recta, esto es, sin variar la orientación, hasta que sea detenido por el usuario. La figura 5.18a muestra las estimaciones de posición realizadas por el GPS cuando se desplaza por la Avda. Zadeh. Nótese que en lugar de mantenerse constante posee un error muy acusado, hasta treinta grados de valor de pico a pico, por lo que en primera instancia no podría considerarse como medida de orientación. Sin embargo, mediante una estimación recurrente de mínimos cuadrados de los datos de orientación de cada medida GPS (figura 5.18b), el comportamiento es muy suave, obteniéndose una aproximación excelente a la orientación real del robot. Así, en la figura 5.18b, la orientación respecto al norte obtenida como resultado de la fusión es de 272.95° y la obtenida de forma analítica de 272.81° (tabla 5.4).

Cálculo de la posición final

Para el cálculo del punto final (x_{fin}, y_{fin}) o de destino del robot, obtenido al pulsar el usuario sobre el mapa de ZOCO situado en el programa CLIENTE, se necesita pasar las coordenadas

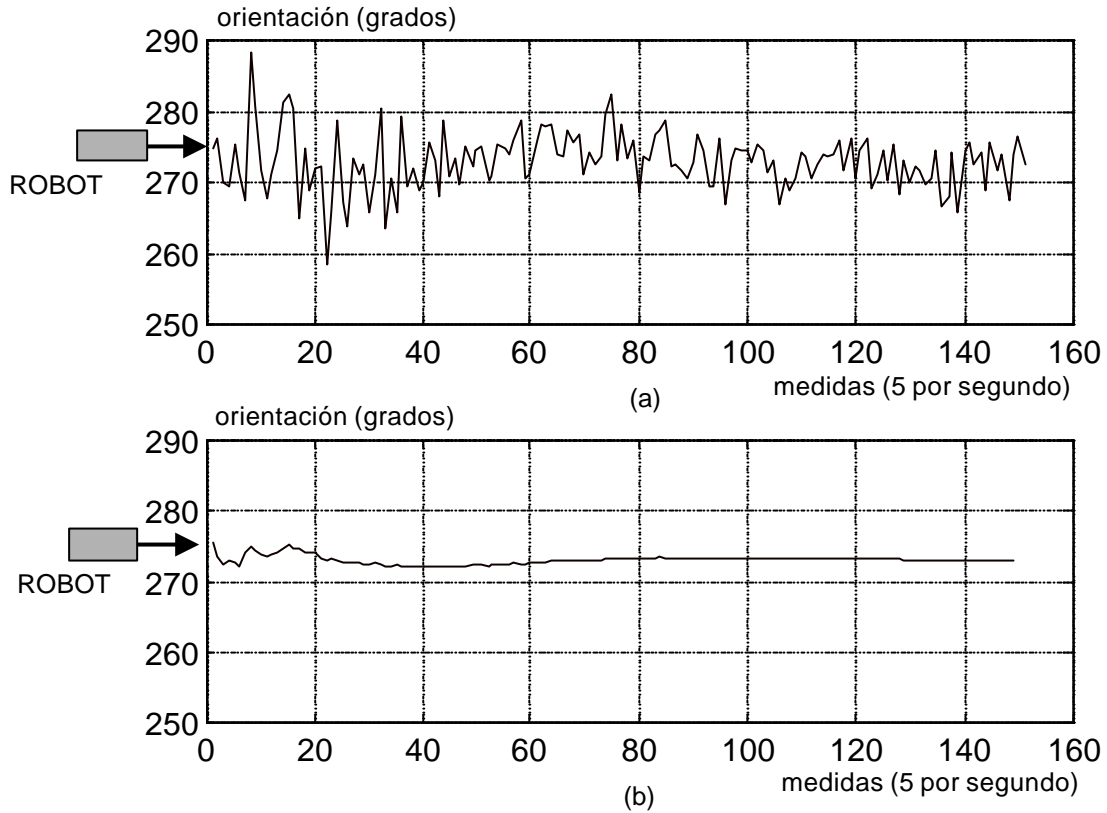


Figura 5.18: Cálculo de la orientación inicial: a) Orientación estimada por el GPS, b) Resultado de filtrar las medidas

(x_d, y_d) en pixels del dibujo a coordenadas locales (expresadas en metros). Los ejes de coordenadas en el sistema de pixels del dibujo se definen con el *eje y* (Y_d) apuntando hacia abajo y el *eje x* (X_d) apuntando hacia la derecha (figura 5.14).

Para establecer la relación entre pixels del dibujo (x_d, y_d) y coordenadas locales en metros (x_{fin}, y_{fin}) , se han obtenido las coordenadas en pixels de los puntos P_0 y P_3 (tabla 5.5). Por tanto:

Vértice	Pixel (dibujo)	Pixel (local)	Coord. local (m)
P_0	(15,228)	(0,0)	(0,0)
P_3	(617,26)	(602,33)	(251.32,-12.35)

Tabla 5.5: Coordenadas en pixels y locales

$$x_{fin} = (x_d - 15) * 251.32 / 602 \text{ metros} \quad (5.100)$$

$$y_{fin} = (y_d - 228) * (-12.35) / 33 \text{ metros} \quad (5.101)$$

5.6.3 Seguimiento de caminos

El desarrollo del agente de comportamiento VE A PUNTO implica no sólo el conocimiento del camino definido por el grafo, sino también el diseño de una estrategia para su seguimiento.

El seguimiento de caminos resulta una tarea fundamental en la navegación de vehículos autónomos. El objetivo es conducir al vehículo por un camino conocido con antelación, teniendo en cuenta para ello en cada periodo de control la posición del vehículo con respecto al camino que se desea recorrer. Mediante el seguimiento de caminos se pretende que el robot móvil ejecute la trayectoria definida con la mayor precisión y el menor esfuerzo de control posibles.

El esquema para el seguimiento de caminos se muestra en la figura 5.19. Como ley de control se ha empleado la persecución pura [Amidi 90]. En ella, se utiliza el error existente entre la posición actual del vehículo y el camino que debe seguir, considerado como un conjunto de *puntos objetivos* para obtener una nueva curvatura que aproxime al robot móvil al camino o que lo mantenga sobre el mismo (figura 5.20). A través del control de bajo nivel del vehículo (nivel inferior de la arquitectura AMARA), el robot realizará un giro, ordenando un determinado ángulo de direccionamiento α a las ruedas directrices, correspondiente a la curvatura deseada⁹. Este ángulo de direccionamiento se obtiene a partir de la curvatura resultante de la técnica de la persecución pura de la siguiente forma: $\alpha = \arctan(\zeta \cdot \gamma)$. Tras el movimiento del vehículo se calcula la posición que éste alcanza, obtenida al integrar la posición odométrica con la estimación GPS.

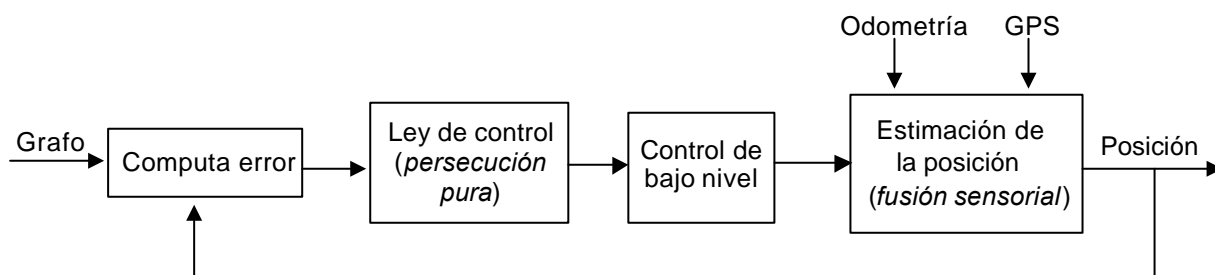


Figura 5.19: Seguimiento de caminos

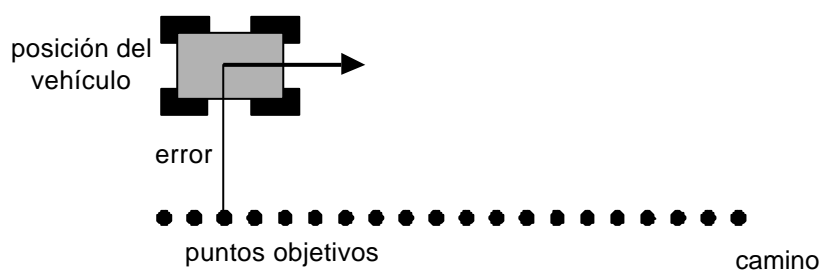


Figura 5.20: Persecución pura

⁹Si la curvatura vale cero, el robot se desplazará en línea recta.

La curvatura del vehículo según la estrategia de persecución pura se obtiene a partir de las variaciones de las coordenadas respecto al sistema de referencial local del vehículo ($\Delta x_l, \Delta y_l$) en la posición actual de éste, que se precisan para alcanzar un punto objetivo en el supuesto de que el vehículo se desplace sobre un arco de circunferencia (figura 5.21). Dichos incrementos se calculan mediante las siguientes ecuaciones (capítulo 4):

$$\Delta x_l = \frac{\cos(\Delta\phi) - 1}{\gamma} \quad (5.102)$$

$$\Delta y_l = \frac{\sin(\Delta\phi)}{\gamma} \quad (5.103)$$

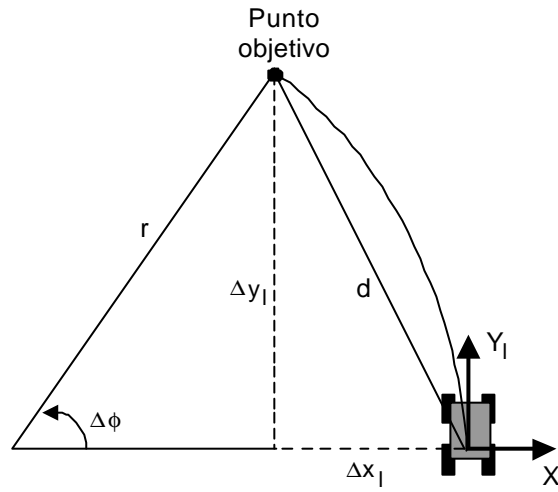


Figura 5.21: Variación de las coordenadas locales

Si se elevan al cuadrado los miembros de las ecuaciones (5.102) y (5.103):

$$\Delta x_l^2 = \frac{(\cos(\Delta\phi))^2 + 1 - 2 \cos(\Delta\phi)}{\gamma^2} \quad (5.104)$$

$$\Delta y_l^2 = \frac{\sin(\Delta\phi)^2}{\gamma^2} \quad (5.105)$$

y se suman miembro a miembro las ecuaciones (5.104) y (5.105) resultantes se obtiene:

$$\Delta x_l^2 + \Delta y_l^2 = \frac{2 - 2 \cos(\Delta\phi)}{\gamma^2} = \frac{-2}{\gamma} \frac{\cos(\Delta\phi) - 1}{\gamma} \quad (5.106)$$

Si se aplica la ecuación (5.102) a la expresión (5.106) resulta que:

$$\Delta x_l^2 + \Delta y_l^2 = \frac{-2 \Delta x_l}{\gamma} \quad (5.107)$$

Denominando d a la distancia en línea recta entre la posición actual del robot móvil y el punto objetivo, cuyo valor se obtiene a partir de la siguiente expresión (figura 5.21):

$$\Delta x_l^2 + \Delta y_l^2 = d^2 \quad (5.108)$$

la curvatura γ que se necesita aplicar para que el vehículo pueda alcanzar el punto objetivo desde su posición actual vale:

$$\gamma = \frac{-2 \Delta x_l}{d^2} \quad (5.109)$$

La expresión (5.109) constituye la ley de control para el método de seguimiento de caminos mediante persecución pura. El seguimiento del camino se realiza así mediante sucesivos ajustes de circunferencias a los distintos puntos objetivos que se calculan en función de la posición del vehículo en su avance (figura 5.22).

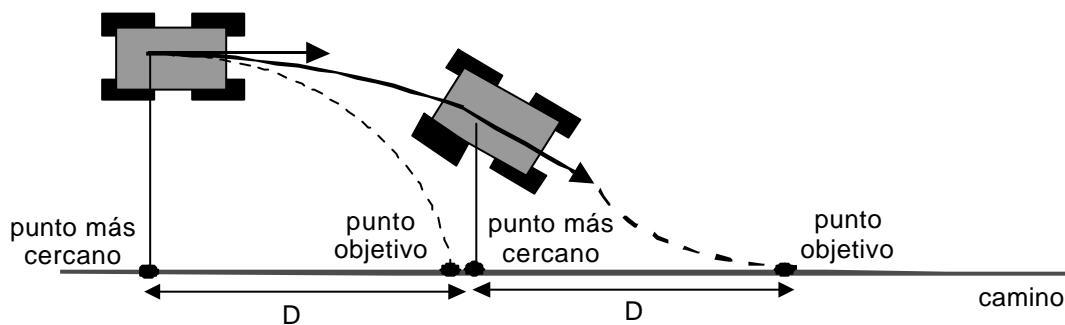


Figura 5.22: Acercamiento del vehículo a una línea recta

La persecución pura del punto objetivo es, por tanto, una técnica de seguimiento de caminos rápida y de fácil implantación, ya que para su aplicación tan sólo se precisa computar la curvatura deseada mediante la ecuación (5.109). Nótese que del punto objetivo sólo se requiere conocer sus coordenadas (x, y) en el plano, y no su orientación ni curvatura. Por tanto, de la adecuada elección del punto objetivo sobre el camino que debe seguirse depende en gran medida la eficacia de este método.

Una estrategia consiste en elegir el punto objetivo a una distancia D por delante del punto más cercano del vehículo a la trayectoria, medido sobre el propio camino de referencia (figura 5.22). Cuanto mayor sea el valor de D más suave será el control, pero el seguimiento empeora. Por el contrario, un valor de D pequeño disminuye los errores en el seguimiento, aunque el control puede hacerse inestable [Martínez 98]. Tras varias experimentaciones, se ha elegido en esta tesis un valor de D igual a 2 m.

Existen dos situaciones en las que el método de seguimiento descrito presenta problemas y que habrá que considerar en un planteamiento más general de la técnica de seguimiento de caminos.

La primera de estas situaciones se origina cuando el robot móvil se encuentra alejado del camino que debe seguir. En este caso d^2 es muy grande en comparación con Δx_l , por lo que la curvatura obtenida por la ecuación (5.109) no es suficiente. Si el vehículo no está apuntando hacia el camino, el radio de curvatura con el que girará será muy grande. Por lo tanto, no se acercará con rapidez al camino e incluso puede ni siquiera acercarse a él. En esta tesis, al considerar al robot moviéndose por las pistas de ZOCO y constituir el camino de referencia la recta que pasa por el centro de cada calle, lo máximo que podría encontrarse alejado sería 3 metros, esto es, la mitad del ancho de las pistas.

El segundo caso en el que la técnica de la persecución pura presenta problemas es aquel en el que el vehículo se halla orientado en sentido opuesto al camino. Aquí, Δx_l resulta muy pequeña o casi nula, y en consecuencia lo propio ocurre con la curvatura deseada. Esto significa que el vehículo gira con un radio de curvatura excesivo para darse la vuelta. En el caso del robot ROJO, debido a la falta de maniobrabilidad en los seis metros de ancho de las pistas, se ha considerado que si el vehículo se encuentra orientado en sentido contrario al grafo óptimo, se le ordena otro grafo distinto para llegar al objetivo de forma que no tenga que cambiar el sentido de avance.

5.7 Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos al aplicar el método de fusión de medidas odométricas y GPS propuesto en esta tesis, empleando para ello el modelo de las transformaciones aproximadas [Pozo-Ruz 01b]. Todos los experimentos que aquí se muestran han sido realizados sobre el robot móvil ROJO en los espacios exteriores del Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Arganda del Rey (Madrid).

Los experimentos que aquí se presentan pueden dividirse en dos fases:

- Estudio de la fusión sensorial de odometría y GPS diferencial. Se muestran los resultados experimentales obtenidos al combinar la información que sobre la posición proporcionan el GPS diferencial y la odometría. Se presenta cómo solucionar aquellos casos de medidas GPS fuera de rango¹⁰ y aquellos en los que la señal GPS no esté disponible al no contar con el número necesario de satélites para posicionar: presencia de obstáculos que impidan la llegada de la señal al receptor, interferencias por tendidos eléctricos, etc.

¹⁰Los fabricantes de GPS indican una precisión del equipo válida para el 95% de los casos. Existe, por tanto, un 5% de las medidas que no cumplen la precisión indicada en las especificaciones, esto es, son medidas *fuera de rango*. Así, si se entiende como medidas fuera de rango aquellas con una precisión menor respecto de la esperada, pueden denominarse así aquellas posiciones obtenidas sin corrección diferencial, es decir, posicionando el receptor en autónomo.

- Implantación de la técnica de fusión sensorial propuesta en el desarrollo del agente de comportamiento VE A PUNTO. Este agente de comportamiento es el encargado de conducir al tractor de forma autónoma desde su posición de partida a un punto especificado por el usuario. El robot calcula en cada instante su posición mediante la fusión de la información proporcionada por el GPS y la odometría, ordenando al control de bajo nivel del vehículo las acciones de movimiento requeridas para alcanzar el punto deseado.

5.7.1 Estudio de la fusión sensorial de odometría y GPS

Se presentan a continuación los resultados de la fusión sensorial de la odometría y GPS. En estos experimentos, se registran de forma simultánea las medidas obtenidas por la odometría y por el GPS en modo diferencial cuando el robot ROJO recorre un determinado camino a una velocidad aproximada de 0.4 m/s. Se ha configurado el receptor GPS a una frecuencia de 0.2 Hz, esto es, el receptor proporciona cinco medidas cada segundo. Estos datos se combinan entonces con la odometría según el mecanismo de fusión propuesto.

Se ha optado por dos tipos de caminos: un camino sencillo, similar a los que recorrerá el robot por las pistas de ZOCO (figura 5.23), y un camino complejo, que contiene numerosos giros (figura 5.24). En ambos casos, se ha representado en cada instante las estimaciones realizadas por la odometría en línea discontinua , y con puntos discretos las medidas de posición obtenidas con el GPS diferencial a bordo del robot.

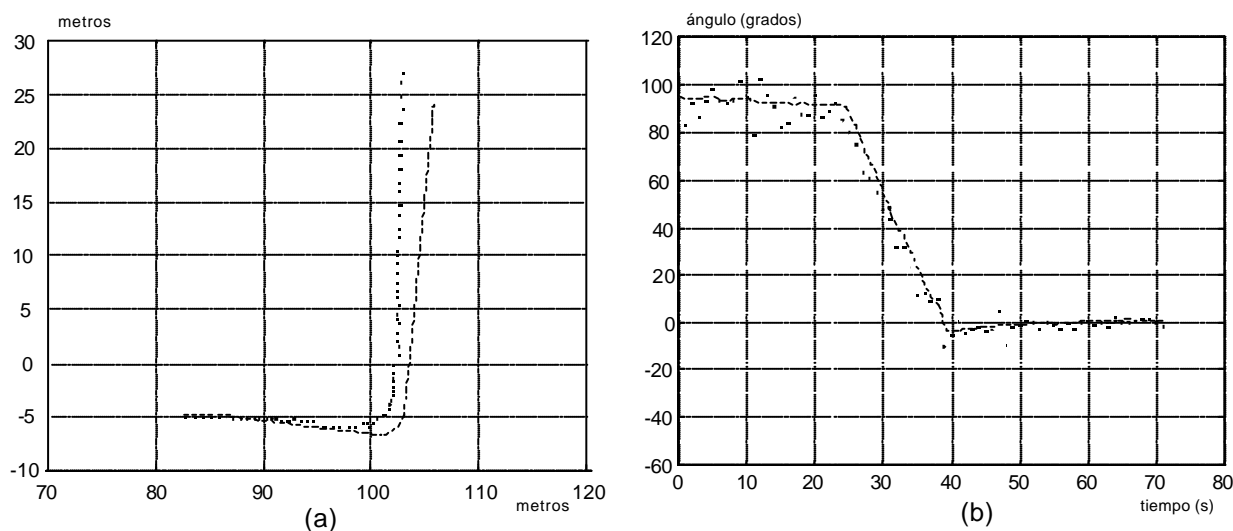


Figura 5.23: Estimación de la posición por odometría (trazo discontinuo) y GPS (puntos discretos): a) Coordenadas en el plano, b) Orientación

La figura 5.23 muestra las estimaciones realizadas por los sensores a bordo del robot ROJO cuando el vehículo recorre un camino compuesto por dos tramos rectos prácticamente perpendiculares entre sí. En la figura 5.23a se presentan las coordenadas en el plano estimadas por el odómetro

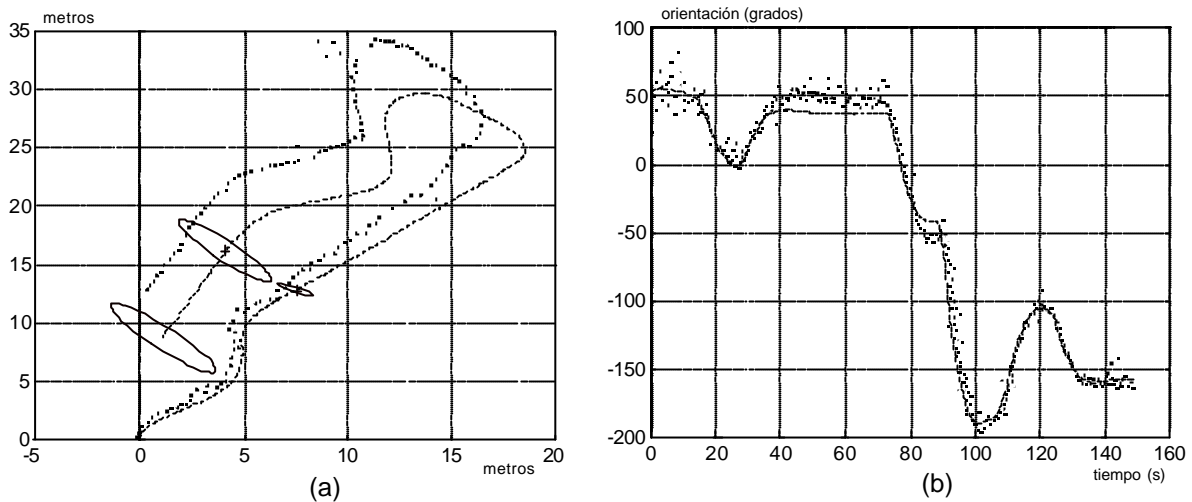


Figura 5.24: Estimación de la posición por odometría (trazo discontinuo) y GPS (puntos discretos): a) Coordenadas en el plano, b) Orientación

$(\hat{x}_{og}(t), \hat{y}_{og}(t))$ y por el GPS $(\hat{x}_{GPS}(t), \hat{y}_{GPS}(t))$ y en la figura 5.23b las estimaciones que ambos sensores realizan de la orientación $(\hat{\phi}_{og}(t) \text{ y } \hat{\phi}_{GPS}(t))$. En lo referente a las estimaciones GPS, se observa la linealidad seguida por las medidas (figura 5.23a), que forman el dibujo de dos tramos prácticamente perpendiculares. En lo que a las estimaciones odométricas se refiere, se observa que en la figura 5.23a, durante el primer tramo recto, su comportamiento es bueno. Sin embargo, a partir del giro, las estimaciones odométricas poseen un error bastante acusado. Al tratarse la odometría de un sensor relativo, este error en la orientación hace que la posición final del vehículo estimada por el odómetro una vez recorrido el segundo tramo recto difiera de la real.

El error odométrico es más acusado cuando el camino es más complejo. Un ejemplo se muestra en la figura 5.24. Este camino comienza con un tramo curvilíneo, lo que implica un error odométrico considerable que se va acumulando en las siguientes estimaciones odométricas. Así, mediante cálculos odométricos exclusivamente, el controlador es incapaz de situar correctamente la posición final. En este experimento (figura 5.24) se muestra también el área donde se puede encontrar el robot móvil con una probabilidad del 95% cuando se ha posicionado únicamente con la información proporcionada por la odometría y cuyo contorno viene definido por la matriz de covarianza $Cov_{og}(t)$ (elipse de incertidumbre)¹¹. Como se observa en la figura 5.24, la incertidumbre en la estimación de la posición interna aumenta a medida que el vehículo avanza.

Se procede entonces a la fusión de las medidas odométricas y GPS para cada uno de los caminos realizados. La figura 5.25 muestra con trazo discontinuo las posiciones $\hat{Loc}_f(t)$ obtenidas al fusionar las estimaciones representadas en la figura 5.23, mientras que la figura 5.26 presenta en

¹¹Las expresiones para el cálculo de los ejes de la elipse de incertidumbre y la orientación de la misma en función de la matriz de covarianza y de la probabilidad deseada se encuentran desarrolladas en [Martínez 94].

trazo discontinuo las posiciones resultantes de fusionar las estimaciones indicadas en la figura 5.24. En ambas figuras, se ha indicado con trazo continuo las posiciones de referencia $Loc_f(t)$ del robot¹². Cada nueva posición $\hat{Loc}_f(t)$ obtenida como fusión de las estimaciones realizadas por el GPS diferencial y el odómetro es la nueva posición de partida para la odometría en el instante $(t + 1)$. De esta forma, la odometría se corrige en cada instante con las estimaciones GPS, disminuyendo la incertidumbre en las estimaciones internas.

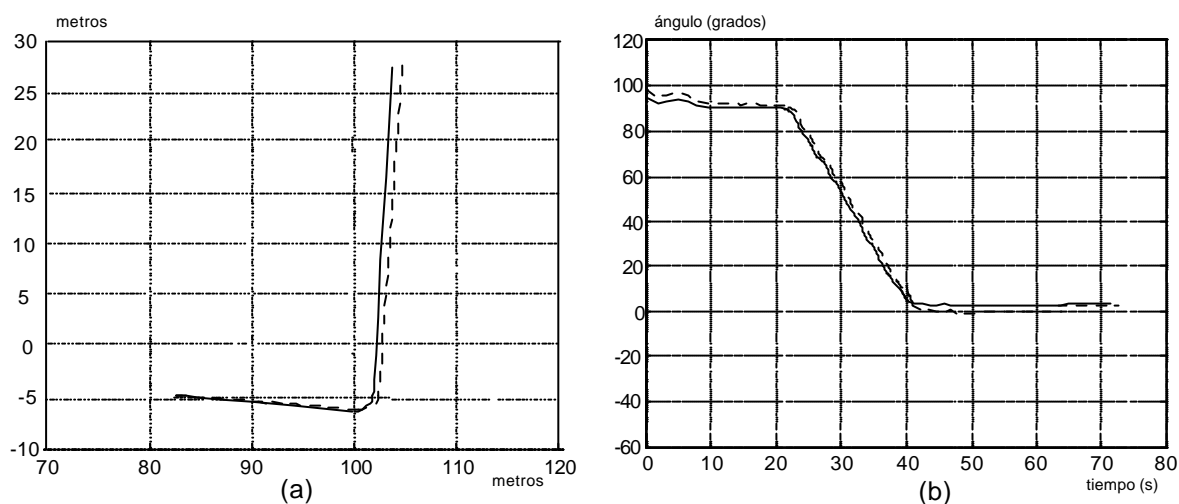


Figura 5.25: Camino de referencia (trazo continuo) y camino resultante de la fusión (trazo discontinuo) de las medidas odométricas y GPS de la figura 5.23: a) Coordenadas en el plano, b) Orientación

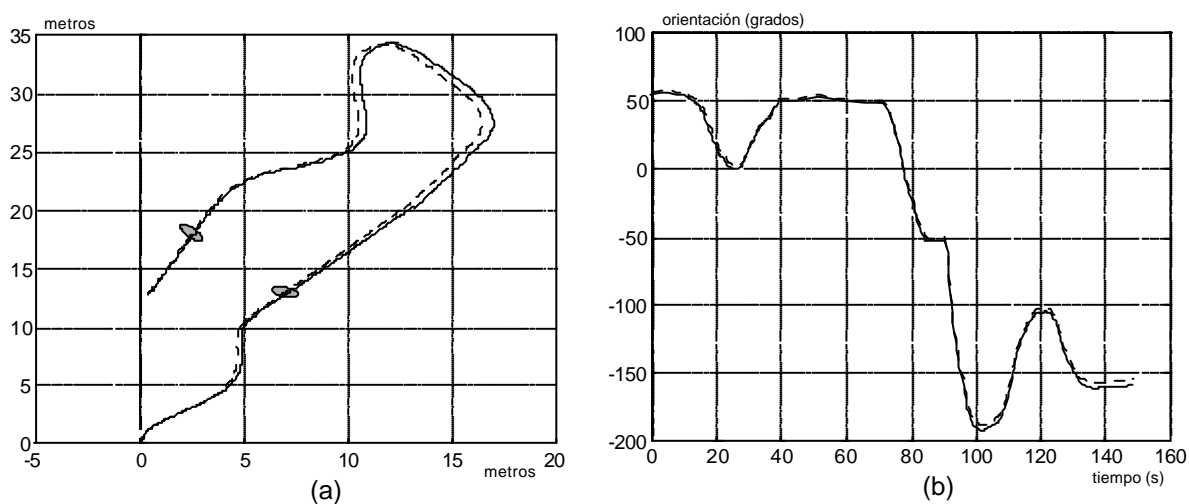


Figura 5.26: Camino de referencia (trazo continuo) y camino resultante de la fusión (trazo discontinuo) de las medidas odométricas y GPS de la figura 5.24: a) Coordenadas en el plano, b) Orientación

Así, para la figura 5.25 se observa como tras el giro, donde se producen los mayores errores odométricos, las medidas externas corrigen a las estimaciones odométricas, consiguiendo así un

¹²Estas posiciones se han obtenido con un GPS centimétrico situado a bordo del robot.

posicionamiento preciso.

En la figura 5.26 se ha representado, en dos instantes de tiempo diferentes, la incertidumbre en la posición obtenida por fusión sensorial y cuyo contorno viene definida por la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ (elipse sombreada). Esta elipse representa la región del espacio donde puede encontrarse el vehículo en el 95% de las veces. Se observa como este área de incertidumbre disminuye considerablemente respecto a la obtenida cuando se posicionaba con sensores odométricos exclusivamente (figura 5.24).

Pero en el mecanismo de fusión de medidas internas u odométricas y externas o estimaciones GPS deben tenerse en cuenta, por un lado, las medidas GPS fuera de rango, esto es, aquellas posiciones GPS con corrección diferencial que no cumplen las especificaciones de precisión esperadas y las calculadas cuando la corrección diferencial no está activa. Por otro lado, debe también considerarse la pérdida de señal GPS por la presencia de obstáculos que impiden la llegada al receptor de la señal de los satélites necesarios para el cálculo de posiciones.

El principal problema a resolver es cómo detectar las medidas fuera de rango. Si la pérdida de precisión está ocasionada por la ausencia de corrección diferencial, ésta viene indicada en el mensaje *NMEA POS* mediante un dígito identificativo (0: posición sin corrección diferencial, 1: posición corregida, apéndice A). La dificultad reside en descubrir la presencia de una medida fuera de rango a pesar de estar la señal diferencial disponible.

La figura 5.27 muestra el resultado de la fusión al considerar como válida una posición GPS de escasa precisión. Esto originaría un funcionamiento erróneo del mecanismo de fusión. Se requiere, por tanto, algún procedimiento que detecte si la estimación GPS obtenida en ese momento es válida para el posicionamiento o bien es una medida fuera de rango.

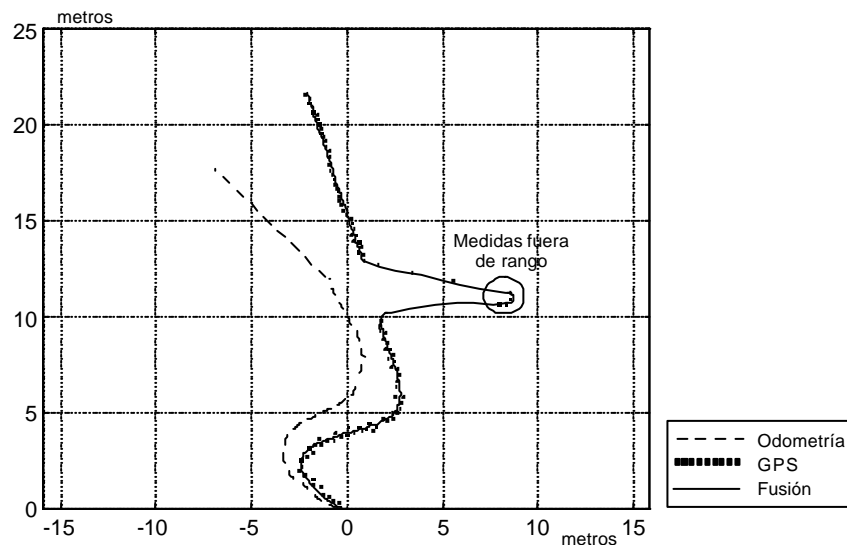


Figura 5.27: Problema de la fusión con medidas fuera de rango de la señal GPS

Una posible solución es calcular la distancia entre dos estimaciones GPS sucesivas y si esta distancia es mayor que un determinado umbral, por ejemplo 3 metros, la estimación GPS es considerada como una medida fuera de rango y no se emplea para la fusión. Sin embargo, esto permite detectar la primera de estas medidas fuera de rango, pero no se asegura la identificación de las restantes. Así, en la figura 5.27 se observa que las estimaciones GPS situadas dentro del círculo están separadas entre sí una distancia menor al umbral prefijado, por lo que serían consideradas en el mecanismo de fusión.

Para evitar este problema, esta tesis adopta otra solución, la cual consiste en comprobar si la estimación GPS obtenida en un determinado instante se encuentra dentro de la elipse de incertidumbre con una probabilidad deseada. El contorno de esta región de incertidumbre viene determinado por la matriz de covarianza, ecuación (5.75), del receptor GPS a bordo del robot. En caso de que la estimación GPS no se encuentre dentro de la región de incertidumbre se considerará una medida fuera de rango y se descarta esta posición en el proceso de fusión.

Al detectar la medida fuera de rango, el cálculo de la posición del vehículo se realizará únicamente con medidas odométricas. Estas estimaciones poseen una precisión válida al haberse corregido en cada instante con las estimaciones GPS previas. Además, como la presencia de medidas fuera de rango se producen por un periodo corto de tiempo, las posiciones odométricas presentan un comportamiento sin grandes errores. Para volver a emplear las estimaciones GPS en el proceso de fusión, éstas deben de situarse de nuevo en el interior de la elipse de incertidumbre centrada en la mejor estimación de la posición, en este caso la proporcionada por la odometría.

La figura 5.28 muestra, como puntos discretos, las estimaciones GPS del experimento presentado en la figura 5.27, y en trazo continuo el resultado de realizar la fusión sensorial. Cuando aparecen las medidas fuera de rango, que han sido detectadas al encontrarse la estimación GPS fuera de su contorno de incertidumbre (matriz de covarianza) centrado en la mejor estimación de la posición obtenida por fusión, se posicionará únicamente con sensores odométricos. Cuando de nuevo la señal GPS recobra el grado de precisión esperado, esto es, cuando la estimación GPS cae otra vez dentro de su elipse de incertidumbre, centrada en este caso en la estimación odométrica, continúa el proceso de fusión. Este mismo proceso seguido para considerar de nuevo las medidas GPS en el mecanismo de fusión tras una medida fuera de rango se emplea también para el caso de pérdida de señal GPS.

Si la señal GPS no estuviera presente durante un periodo largo de tiempo, o bien si existiesen muchas medidas fuera de rango seguidas, la estimación odométrica empeoraría al no ser corregida. Una medida de precaución en caso de ausencia de la señal GPS durante un intervalo considerable de tiempo consiste en disminuir la velocidad del vehículo, pues a menor velocidad las estimaciones de posición obtenidas por odometría sufren un error menor.

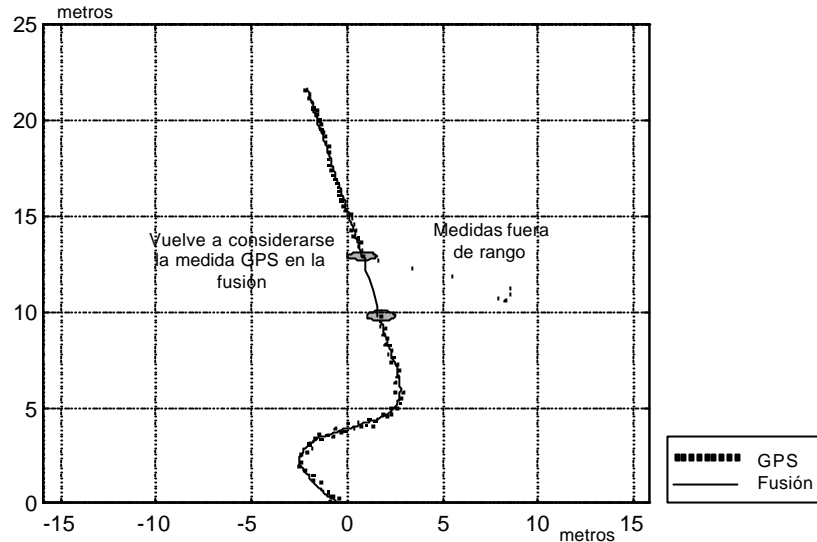


Figura 5.28: Solución al problema de las medidas fuera de rango de la señal GPS

5.7.2 Validación del agente VE A PUNTO

Una vez comprobada la eficacia del algoritmo de fusión propuesto, se aplica ahora en el desarrollo del agente de comportamiento VE A PUNTO (sección 5.6). Este agente tiene como entrada el grafo o camino a seguir por el robot para alcanzar el punto final especificado por el usuario desde la posición inicial en la que se encuentre el robot. A partir de la información proporcionada por los sensores odométricos y GPS a bordo del robot, estima la posición del vehículo por el mecanismo de fusión descrito, y dependiendo de la misma y del punto objetivo a alcanzar, ordena al controlador de bajo nivel del vehículo una secuencia de órdenes de movimiento: puesta en marcha del robot, ángulo de giro del volante y parada del vehículo, mediante el código de mensajes definido (tabla D.2, apéndice D). El ángulo de giro ordenado al volante se obtiene a partir del cálculo de la curvatura del vehículo, la cual se computa por el mecanismo de persecución pura descrito en el apartado 5.6.3. Un diagrama de flujo descriptivo de las acciones que lleva a cabo el agente de comportamiento VE A PUNTO se muestra en la figura 5.29.

En la figura 5.29 se comprueba en primer lugar si el grafo está compuesto por una o más rectas (la variable n indica el número de rectas). Si está compuesta por más de una recta, el robot debe realizar un giro para pasar de una determinada calle de ZOCO a la siguiente indicada por el grafo. Debido a las limitaciones en la maniobrabilidad del vehículo, para realizar un giro de forma suave se requiere una distancia mínima entre la posición actual del robot y el vértice que marca la intersección entre las rectas. A esta distancia es a la que se ha denominado en la figura 5.29 d_{giro} . Así, tal y como se indica en el diagrama de flujo, si la distancia entre la posición actual del vehículo y la del vértice siguiente es menor que d_{giro} , se decreta en una unidad las rectas del grafo y se pasa a recorrer la siguiente recta de la trayectoria ordenada al robot.

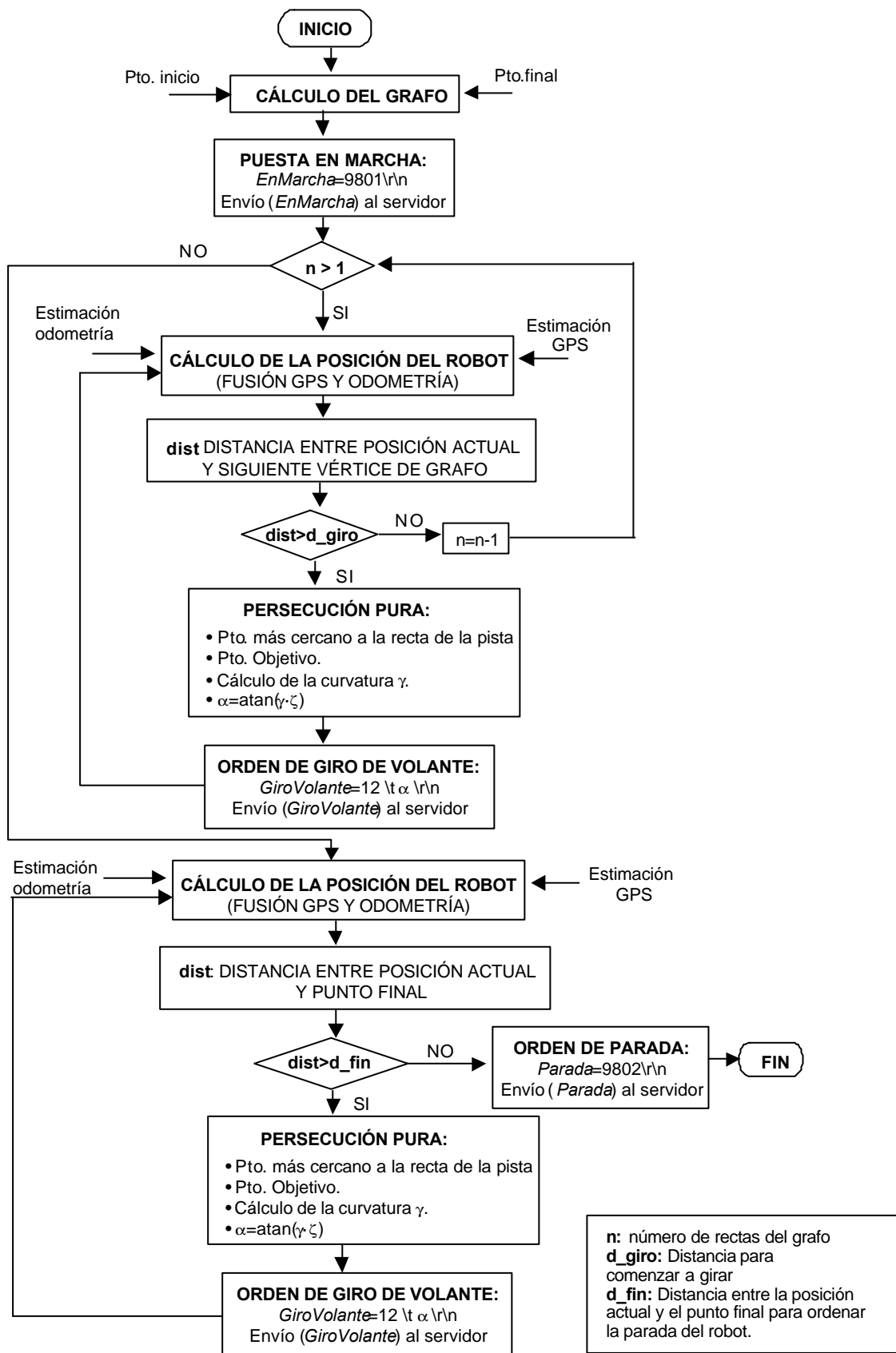


Figura 5.29: Secuencia de acciones del agente VE A PUNTO

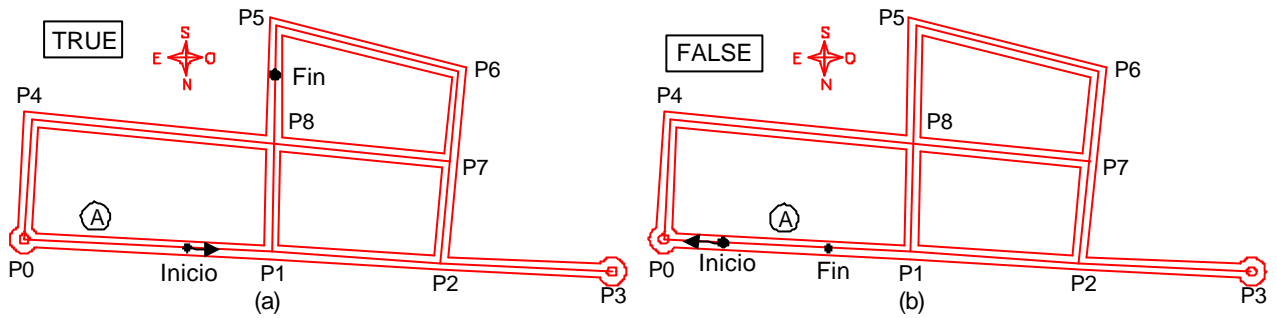


Figura 5.30: Puntos de inicio y fin: a) Experimento 1, b) Experimento 2

Tras varios ensayos, se ha tomado como valor para d_{giro} 2 metros¹³.

Cuando el número de rectas que componen el grafo o bien cuando el número de rectas que quedan por recorrer del mismo es igual a 1, la parada del robot se ordena cuando la distancia entre la posición actual del vehículo y el punto final especificado por el usuario es menor o igual a d_{fin} . Al ser el GPS de precisión submétrica, se ha considerado para d_{fin} el valor de 1 metro.

Se muestra a continuación los resultados obtenidos en dos experimentos al conducir de forma autónoma al tractor desde su posición de partida a un punto especificado por el usuario aplicando el agente de comportamiento VE A PUNTO. El punto de inicio y fin y la orientación inicial del vehículo para el primer experimento se muestra en la figura 5.30a y para el segundo en la figura 5.30b.

Así, como muestra la figura 5.30a, en el primer experimento se trata de llevar al tractor desde un punto del segmento A a otro punto del segmento I, siendo la dirección del robot TRUE (figura 5.15). En el segundo experimento (figura 5.30b) el robot irá de un punto a otro de la calle Avd. Zadeh, siendo la dirección FALSE (figura 5.15). Por tanto, los grafos resultantes son:

- Experimento 1:

$$- Grafo = \{2, 0, 458952.92, 4462551.94, 1, 4, 2\}$$

- Experimento 2:

$$- Grafo = \{5, 0, 459060.11, 4462551.94, 0, 3, 459057.15, 4462499.20, 2, 1, 458953.82, 4462510.40, 1, 4, 458952.92, 4462556.60, 3, 0, 0\}$$

Las figuras 5.31 y 5.32 muestran los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos. Así, la figura 5.31a presenta, superpuesta en las pistas de ZOCO, la trayectoria seguida por el tractor al navegar de forma autónoma desde el punto de inicio al punto final especificado

¹³Este valor, en una topología distinta, podría ajustarse haciéndolo proporcional el radio de giro a la agudeza del ángulo, si bien influyen otros parámetros tales como la tolerancia permitida en el seguimiento del camino.

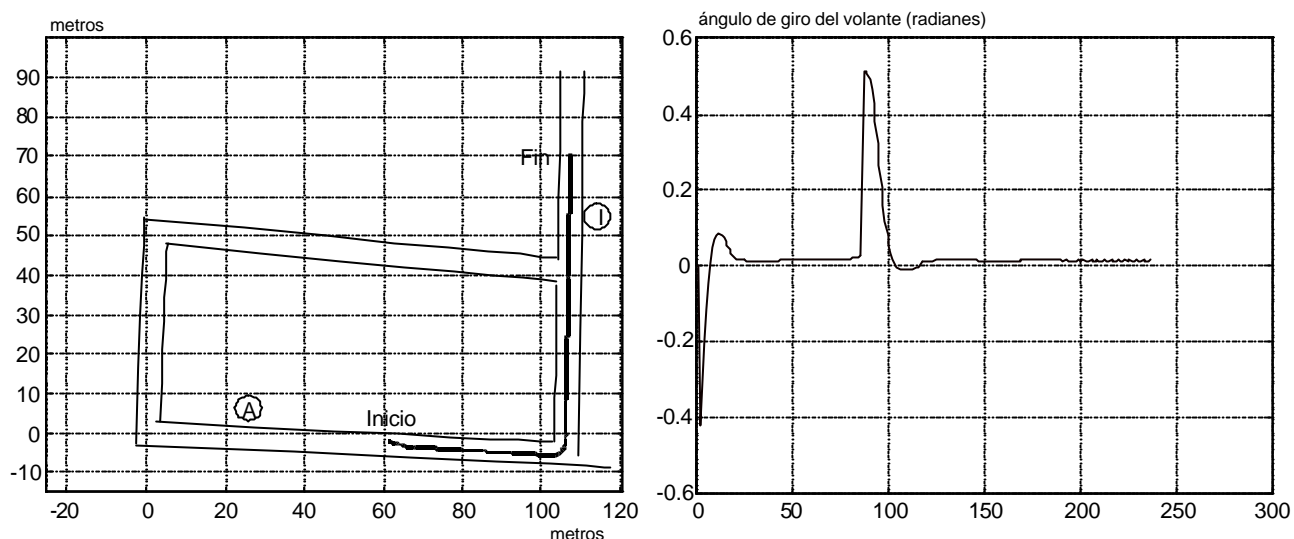


Figura 5.31: Agente VE A PUNTO para ir del segmento *A* al *I*: a) Trayectoria, b) Ángulo de giro ordenado al volante

por el usuario empleando la estrategia de persecución pura y donde la posición del vehículo en cada momento se ha calculado a partir de las estimaciones del GPS y de la odometría según el algoritmo de fusión presentado. El camino de referencia se corresponde con la línea central de cada pista o calle de ZOCO. La figura 5.31b muestra en el tiempo el ángulo α ordenado al volante cada dos segundos para la ejecución de la trayectoria. Se observa que al estar el tractor inicialmente en una posición cercana al centro de la pista y al ser el camino de referencia la línea central de la misma, el robot realiza un giro que lo aproxime al camino deseado. Este giro es mayor en la figura 5.31b por ser mayor la separación entre la posición inicial del robot y el camino de referencia.

Las figuras 5.32a y 5.32b muestran idénticos parámetros que las figuras 5.31a y 5.31b, pero en este caso para el experimento 2.

Se observa que en ambos casos el comportamiento es bastante preciso y sin brusquedades, gracias a la suavidad con que se estima en cada instante la posición y a la técnica de cálculo de curvatura del vehículo empleada. En caso de medida GPS fuera de rango, o pérdida momentánea de la señal, se recurre a las estimaciones odométricas, cuya precisión es aceptable para cortos periodos de tiempo al haberse actualizado en cada momento con las estimaciones GPS previas. Además, aunque las medidas GPS no se encuentren presentes como entradas al mecanismo de fusión en ciertos momentos, la baja velocidad de movimiento del vehículo origina que los errores de odometría sean menos importantes, logrando un posicionamiento excelente para la tarea requerida.

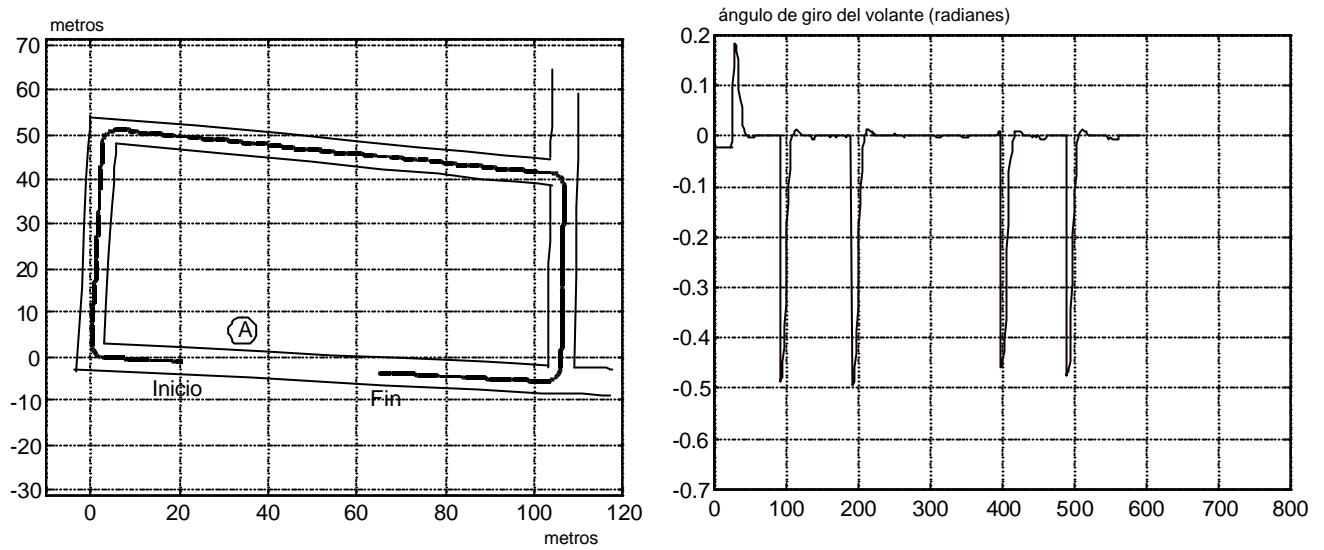


Figura 5.32: Agente VE A PUNTO para ir del segmento A al A: a) Trayectoria, b) Ángulo de giro ordenado al volante

5.8 Recapitulación

En este capítulo se ha presentado un método general para obtener el valor óptimo de una determinada variable física a partir de la información con incertidumbre que sobre la misma proporcionan distintos sensores. Este mecanismo tiene en cuenta la naturaleza del ruido asociado a las medidas. Como herramienta matemática de representación de la información se ha empleado la técnica de las transformaciones aproximadas, que viene dada como la estimación de la variable obtenida del sensor junto a la matriz de covarianza que representa la incertidumbre de la estimación.

Se ha aplicado este algoritmo de fusión general al cálculo de la posición del robot ROJO. Para ello se ha caracterizado la naturaleza del error asociado a las medidas de posición obtenidas por los dos sensores empleados en el cálculo de la posición: un odómetro como sensor interno y un GPS diferencial como sensor externo.

En el caso de los odómetros, las medidas se encuentran contaminadas con ruido blanco siempre y cuando se eliminen los errores sistemáticos. En el caso del GPS, sin embargo, se ha demostrado la existencia de ruido coloreado o autocorrelacionado. Además, por el propio método de fusión, las medidas internas y externas se encuentran correlacionadas en el tiempo.

Se han obtenido de forma experimental la matriz de covarianza relacionada con el crecimiento de la incertidumbre en las estimaciones odométricas en el tractor ROJO, así como las matrices de covarianza del receptor GPS diferencial a bordo del robot.

Por la naturaleza de los sensores utilizados, el modelo propuesto es muy valioso cuando se desea

una localización continua del vehículo en tiempo real para la navegación en campo abierto con grandes recorridos. El algoritmo es de carácter iterativo, de fácil desarrollo y de reducido coste computacional, proporcionando la mejor estimación de la posición del vehículo y la incertidumbre asociada a dicha estimación. Tanto la posición como la incertidumbre vienen expresadas en función de un término $G(t)$. El mecanismo de fusión que se presenta en este capítulo puede generalizarse a un número mayor de sensores.

Se han presentado los resultados experimentales sobre el tractor ROJO obtenidos al fusionar las medidas de GPS y odometría. En ellos, el GPS se emplea como principal sistema para el cálculo de la posición, y corrige la odometría en cada instante de tiempo. Así, aunque las señales GPS se encuentren fuera de rango o bien no estén disponibles en ese momento debido a que la presencia de obstáculos en el entorno impide la llegada de señal de un número suficiente de satélites para el cálculo de posiciones, el robot navegará únicamente con sensores internos. El comportamiento obtenido en estos casos es aceptable para cortos periodos de tiempo, pues la medida odométrica ha sido corregida con estimaciones GPS previas y la velocidad a la que viaja el tractor es pequeña.

Por último, el sistema completo ha sido validado con éxito mediante la implantación del agente de comportamiento VE A PUNTO, programa cliente perteneciente al nivel medio de la arquitectura AMARA. Este agente de comportamiento requiere conocer el camino entre el punto de inicio y el deseado y el diseño de una estrategia para su seguimiento. El camino a recorrer por el robot puede ser obtenido a partir de cualquier planificador de caminos de los existentes en la literatura, lo que permite plantear soluciones óptimas en entornos más complejos. Como técnica de seguimiento de caminos se ha empleado la de la persecución pura, cuya aplicación precisa conocer tan sólo la curvatura a ordenar al vehículo para el correcto recorrido del camino deseado.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas de futuros desarrollos

*Cuando hagas un alto en el camino,
ponte siempre de espaldas a lo que has recorrido
y de cara a lo que te queda por recorrer.*

Proverbio chino

6.1 Conclusiones

Las principales aportaciones que se realizan esta tesis son las siguientes:

- Revisión bibliográfica detallada de las principales aplicaciones de los robots de exteriores que han ido apareciendo a lo largo de la historia de la robótica móvil. Se presenta también un recorrido por los principales sistemas para el conocimiento de la posición de un robot en tiempo real.
- Estudio del sistema GPS concretado en los siguientes puntos:
 - Estado del arte del sistema GPS.
 - Estudio experimental del sistema GPS en modo absoluto en presencia de la disponibilidad selectiva y en ausencia de ésta.
 - Estudio experimental de las diferentes formas de llevar a cabo el posicionamiento diferencial de vehículos autónomos en tiempo real, comparando la precisión ofrecida por cada una de ellas en relación al precio del equipo.
- Se justifica la necesidad de un sistema multisensorial para conseguir los requisitos de continuidad, disponibilidad y robustez necesarios en todo sistema de posicionamiento. Se

discuten las ventajas e inconvenientes de diferentes alternativas a utilizar como sistema sensorial para la localización en exteriores, para optar por la implantación de un sistema sensorial que, empleando un mínimo número de sensores complementarios y redundantes, en concreto un odómetro como sensor interno y un GPS diferencial como sensor externo y herramienta principal de posicionamiento, permitan localizar al robot móvil en un entorno de exteriores de forma continua, robusta y en tiempo real.

Como técnica diferencial hemos utilizado el sistema Omnistar, que envía las correcciones diferenciales en código a través de un satélite geostacionario consiguiendo una precisión algo menor al metro en el 95% de los casos, a diferencia de la mayoría de las referencias encontradas en la literatura que utilizan el sistema RTK de precisión centimétrica y elevado coste.

- Para combinar la información que sobre la posición ofrecen diferentes sensores, hemos formulado un modelo de fusión probabilístico que, partiendo de las estimaciones con incertidumbre proporcionada por los sensores, permite obtener la mejor estimación de la magnitud medida y la incertidumbre asociada a esta mejor estimación.

La técnica de fusión sensorial propuesta distingue la naturaleza del error asociado a las medidas de los sensores: ruido blanco y coloreado o autocorrelacionado, y la existencia o no de correlación entre las mismas. Por su carácter general, esta técnica puede emplearse para la combinación de cualquier magnitud física que haya sido medida en un mismo instante de tiempo por diferentes sensores y para un número cualquiera de ellos, previa caracterización del error asociado a las medidas.

- Hemos desarrollado una técnica para la corrección de los errores sistemáticos debidos a las imperfecciones en el diseño mecánico del vehículo y a la falta de resolución de los sensores y que permite además calcular la matriz de covarianza o incertidumbre asociada a las estimaciones de posición. Esta técnica tiene su aplicación para vehículos que navegan en entornos de exteriores. Se ha caracterizado también el error de las medidas DGPS y su matriz de covarianza.

Al ser la odometría un sensor relativo, se ha analizado el crecimiento de la incertidumbre en las estimaciones de posición con el avance del vehículo.

- El método de fusión propuesto se ha aplicado para combinar, en cada instante, la información que sobre la posición ofrece la odometría y el DGPS. Se consigue así un posicionamiento continuo y preciso aún en ausencia de señal GPS.
- Se ha ampliado la definición de la arquitectura jerárquica multinivel (arquitectura AMARA) basada en agentes de comportamiento reactivos y planificados para la navegación de

robots autónomos implantada en varios robots de interiores a la navegación de entornos de exteriores.

Así, hemos integrado en dicha arquitectura los agentes de comportamiento del nivel inferior, que incluye el tratamiento de la información de los diferentes sensores a bordo del robot y el gobierno del movimiento de bajo nivel del vehículo. De igual forma, hemos definido los protocolos de comunicación, el conjunto de mensajes entre servidor y cliente y los interfaces con el usuario.

- Hemos completado la arquitectura con el desarrollo e implantación del agente de comportamiento VE A PUNTO, perteneciente al nivel medio de la arquitectura AMARA, que permite la navegación autónoma del vehículo de un punto a otro, cumpliendo con los requisitos de orientación y curvatura permitidos en el robot.

El camino a recorrer por el robot para alcanzar el punto final deseado desde su posición de partida puede ser obtenido a partir de cualquier planificador de caminos de los existentes en la literatura, lo que permite plantear soluciones óptimas en entornos complejos. Como técnica de seguimiento del camino generado hemos aplicado la de la persecución pura, de fácil implantación al precisar tan sólo la curvatura a ordenar al vehículo para el correcto recorrido del camino deseado.

- Hemos validado experimentalmente con éxito los desarrollos presentados en el robot tractor ROJO, un tractor comercial cuya automatización forma parte del trabajo que aquí se presenta. Se demuestra la eficacia del método de fusión sensorial propuesto aun empleando sensores de coste medio/bajo y en situaciones en que la señal GPS, herramienta principal de posición, no está presente.

6.2 Sugerencias para futuros trabajos

Las líneas de futuros desarrollos que quedan abiertas tras esta tesis son:

- Ampliación del sistema sensorial del tractor para que cubra otras necesidades además del conocimiento de la posición. La incorporación de sensores como un láser o una cámara de vídeo permitirá el desarrollo de tareas o agentes de comportamiento más complejos dentro de la arquitectura, como el de evitación de obstáculos o el reconocimiento de objetos.
- Modificación del sistema de proceso empleando unidades lógicas de proceso de bajo coste basadas en microcontroladores, mejor adaptadas a las necesidades de adquisición y envío de señales y proceso de las mismas.

- Inclusión en el agente de comportamiento VE A PUNTO de grafos más complejos.
- Generalizar el cálculo de la *distancia hacia delante* en el método de seguimiento de caminos, de forma que se permita un ajuste óptimo para el seguimiento de trayectorias más complejas.

Apéndice A

Descripción de los receptores GPS y mensajes NMEA empleados

Se ofrece en este apéndice una descripción de los receptores GPS con los que se ha trabajado en esta tesis, así como la estructura de los mensajes NMEA-0183 empleados.

A.1 El receptor GPS GN-74

El receptor GPS GN-74 (figura A.1) [Furuno 95] es un receptor de bajo coste desarrollado sobre una tarjeta de pequeñas dimensiones (40 mm. x 91 mm. x 14 mm. y 80 gr de peso) alimentada a 5 V, que permite su conexión a un computador, con el que se comunica bidireccionalmente a través de su puerto serie. Al emplear el receptor GPS señales TTL para la comunicación con el exterior, se precisa de un conversor a los niveles permitidos por el protocolo RS232, así como un regulador de tensión a los 5 V requeridos.

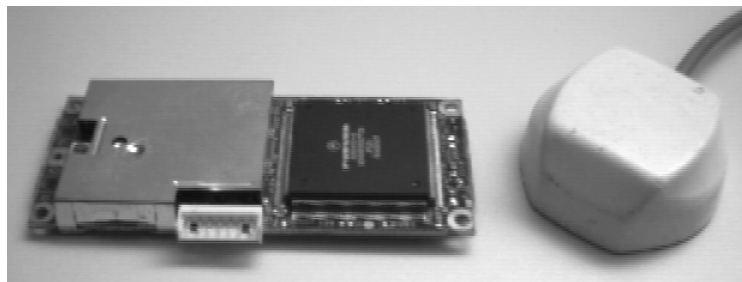


Figura A.1: Receptor GPS GN-74

Al receptor GPS va conectada una antena AU-8-7T de dimensiones reducidas (45.2mm de diámetro, altura 18.7 mm y peso de 60 gr) alimentada a 5 V DC, y con un consumo máximo de 40 mA. La antena está unida a un cable 1.5D-QEW de 5 m. con conector TNC. Una batería de *buck-up* de 3 V permite almacenar valores de configuración, tales como las coordenadas calcu-

ladas en la última sesión, lográndose así una inicialización rápida del sistema. A fin de proteger al receptor de golpes, agentes externos y facilitar su transporte y conexión, se han integrado el receptor, la batería de *buck-up* y la tarjeta de conversión de TTL a RS232, en una caja de aluminio. Dicha caja posee tres conectores externos: uno para la antena del receptor GPS, otro para la fuente externa que lo alimenta y un tercero para el cable que permite el intercambio de información entre el receptor GPS y un computador a través del puerto serie, empleando el protocolo estándar NMEA-0183 [NMEA 92].

El receptor GPS GN-74 posee ocho canales de recepción, esto es, es capaz de obtener la posición de su antena sobre la superficie terrestre empleando de forma simultánea en los cálculos hasta un máximo de ocho satélites: un satélite por canal. Sin embargo, aunque los cálculos de posicionamiento sólo los realiza en base a ocho satélites, el receptor realiza el seguimiento sobre un total de doce satélites. Así, cuando un satélite deja de utilizarse para el posicionamiento, el receptor tiene ya disponible la señal de un nuevo satélite para realizar los cálculos.

El receptor GPS GN-74 permite operar en modo diferencial, siendo capaz de recibir ciertas tramas RTCM SC-104 [RTCM 90] en código procedentes de una o más estaciones bases situadas en puntos de la superficie terrestre con coordenadas conocidas. El procesamiento de la información recibida en estos mensajes permite al receptor GPS corregir los errores de su posición de forma automática, alcanzando precisiones de 5 m en el 95% de los casos.

Para que el receptor GN-74 pueda emplear el protocolo NMEA se requiere la configuración:

- **Velocidad:** 4800 Bd.
- **Longitud de datos:** 8 bits.
- **Bits de parada:** 1 bit.
- **Paridad:** Nula.

A.2 El receptor GPS G8

El receptor GPS G8 (figura A.2) [Ashtech 98] se embebe en una tarjeta de pequeñas dimensiones provista, al igual que el GN-74, de ocho canales, esto es, permite calcular la posición en la que se encuentra su antena empleando como máximo ocho satélites.

El receptor GPS G8 es capaz de recibir correcciones diferenciales en código a través del protocolo RTCM-104 [RTCM 90], alcanzando precisiones que oscilan entre los 3 m. y 6 m. en el 95% de los casos.

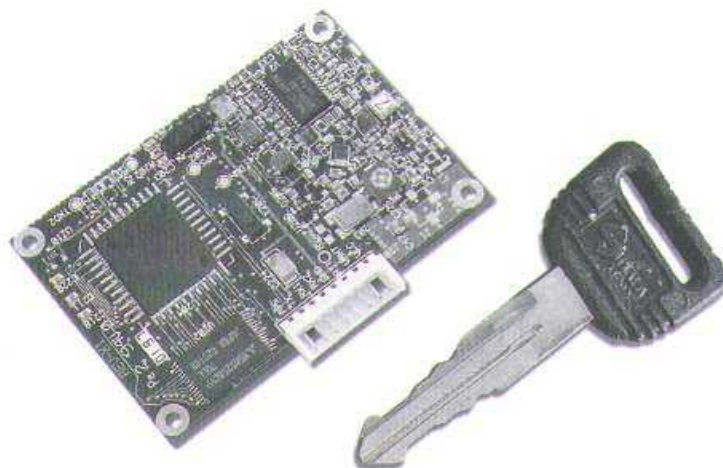


Figura A.2: Receptor GPS G8

Al igual que el resto de los receptores, trabaja con señales TTL y se alimenta a un voltaje de 5 V. Puede disponer además de una batería de *back-up* de 3 V para almacenar ciertos valores de configuración tales como el tipo de tramas a recibir por cada puerto, la última posición calculada, etc. Para proteger al receptor de posibles golpes o de agentes externos, éste se ha ubicado, junto a la batería de *back-up*, la tarjeta de conversión de señales TTL a RS232 y un regulador de tensión, en el interior de una caja metálica.

La tarjeta G8 posee dos puertos serie independientes, uno dual de entrada/salida y otro sólo de entrada. El primero de ellos se conecta al puerto serie de un PC para llevar a cabo la configuración de la tarjeta y el volcado de los datos. El otro puerto serie tiene como función la recepción de tramas diferenciales en código en formato RTCM SC-104 [RTCM 90] enviadas desde cualquier estación de referencia. Los puertos serie pueden configurarse a diferentes velocidades aunque la paridad, bits de stop y bits de datos se mantienen invariables a los siguientes valores:

- **Longitud de datos:** 8 bits.
- **Bits de parada:** 1 bit.
- **Paridad:** Nula.

A.3 El receptor GPS Z12

El receptor Z12 (figura A.3) [Ashtech 96b] es un sensor de tiempo real que puede operar bien como un receptor GPS propiamente dicho, ya sea funcionando en modo diferencial o absoluto, o bien como una estación base de referencia, generando correcciones diferenciales en tiempo real

en código o en código y fase, según el modo de operación del receptor destino.



Figura A.3: Receptor GPS Z12

El sensor Z12 dispone de 12 canales, esto es, es capaz de procesar de forma conjunta la señal procedente de 12 satélites para proporcionar, en tiempo real, la posición, velocidad y medidas de tiempo. Opera con un rango de voltaje de entrada entre 10 V y 32 V procedente de una fuente de alimentación externa. Tanto la circuitería necesaria para el regulado de tensión, así como la de conversión de TTL a RS232 y la batería de *back-up* las proporciona el fabricante. Todo ello, junto con el propio sensor, se sitúa en el interior de una caja metálica.

El Z12 posee tres puertos series, dos de ellos bidireccionales (puertos *A* y *B*) y el tercero, etiquetado como *C*, unidireccional. El puerto *A* se emplea para llevar a cabo la configuración del sensor, así como para la salida a un PC de las posiciones que el sensor calcula, ya sean corregidas o no. Este puerto puede trabajar a distintas velocidades aunque el resto de los parámetros de configuración del mismo permanecen invariables en los valores siguientes:

- **Longitud de datos:** 8 bits.
- **Bits de parada:** 1 bit.
- **Paridad:** Nula.

El puerto B ofrece como salida las correcciones diferenciales RTCM SC-104 [RTCM 90], en código o código-fase, según la configuración efectuada, y puede ser conectado a cualquier otro receptor GPS capaz de recibirlas y procesarlas.

A.4 El receptor GPS ACEII

El receptor ACEII (figura A.4) [Trimble 98a] es un receptor GPS provisto de ocho canales. Al contrario del GPS GN-74 y del GPS G8, el ACEII ya incluye en una caja metálica, además del receptor GPS, toda la circuitería para regular la tensión de alimentación, la conversión TTL-RS232 y la batería de *buck-up*. Como salidas dispone de un conector de alimentación en el rango de 9-32 V, un conector para la antena y dos conectores puerto serie.

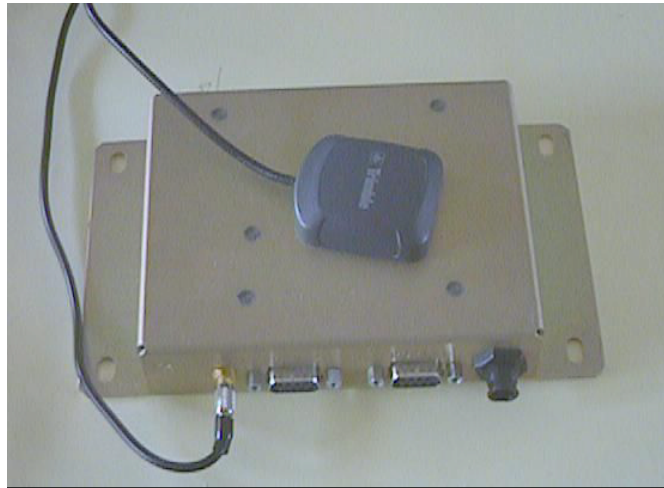


Figura A.4: Receptor GPS ACEII

Cada uno de estos dos puertos serie son independientes entre sí, bidireccionales y pueden ser configurados a diferentes velocidades, aunque los bits de datos, bits de stop y paridad permanecen invariables:

- **Longitud de datos:** 8 bits.
- **Bits de parada:** 1 bit.
- **Paridad:** Nula.

El puerto etiquetado como *PORT 1* admite los protocolos TSIP (*Trimble Standard Interface Protocol*) y el TAIP (*Trimble ASCII Interface Protocol*), ambos propios del fabricante. El puerto etiquetado como *PORT 2* se utiliza para la recepción de las correcciones diferenciales en protocolo RTCM [RTCM 90] y como salida proporciona mensajes estándares del protocolo NMEA [NMEA 92]. De todas los mensajes propias del protocolo NMEA, este receptor sólo recibe dos: la trama GGA y la trama VTG; para la recepción del resto de los mensajes NMEA se requiere el pago de un plus adicional.

A.5 El receptor GPS 3100LR12

El receptor GPS 3100LR12 (figura A.5) está compuesto por una tarjeta GPS G12 y un decodificador de la señal Omnistar procedente de un satélite geoestacionario (capítulo 3). La alimentación del equipo es de 12 V.



Figura A.5: Receptor GPS 3100LR12

La tarjeta GPS G12 procesa la señal de la constelación GPS, proporcionando medidas de posición, velocidad y tiempo. Posee un total de 12 canales y puede obtener medidas mediante el retraso de código (señal C/A) como por la detección de fase de la portadora L1. Los modos de funcionamiento de la tarjeta GPS G12 son los siguientes:

- Como receptor diferencial, bien en código o bien como receptor con módulo RTK (correcciones en código y fase), en función de la corrección RTCM recibida.
- Como base o generador de correcciones diferenciales, tanto en código como en fase.

El receptor GPS 3100LR12 incluye también un decodificador de la señal Omnistar, esto es, de corrección diferencial en código transmitida desde un satélite geoestacionario. Esta señal puede enviarse bien a un receptor GPS externo o bien al receptor G12 interno. Cuando la tarjeta GPS G12 calcula posiciones empleando la señal Omnistar, se consiguen precisiones por debajo del metro en el 95% de los casos. El receptor GPS 3100LR12 posee una única antena para la recepción de las señales de los satélites de la constelación GPS que emplea la tarjeta G12 y para la recepción de la señal Omnistar desde el satélite geoestacionario.

El GPS 3100LR12 posee tres puertos: *Utility*, *Auxiliar* y *Data*. El puerto *Utility* permite configurar el receptor GPS G12 interno, ya sea la velocidad del puerto, máscara de satélites, intervalo de tiempo entre mensajes NMEA, etc., así como indicar si se desea que funcione como receptor o como generador de correcciones de código o de código y fase. El puerto *Auxiliar* permite la salida de los mensajes diferenciales, bien los generados por el receptor G12 en caso

de estar configurado como base o bien las correcciones Omnistar para ser empleadas por un receptor GPS externo. Por último, el puerto *Data* permite el volcado de mensajes NMEA de la tarjeta G12 a un PC.

A.6 El receptor GPS MS750

El receptor GPS MS750 [Trimble 98a] es un receptor GPS de 12 canales con módulo RTK (figura A.6). El equipo puede funcionar bien como receptor o bien como generador de correcciones diferenciales de código y fase.



Figura A.6: El receptor GPS MS750

En el receptor GPS MS750 se distinguen dos puertos: *A* y *B*. Estos puertos son configurables tanto para actuar como receptores/emisores de la señal diferencial como para el volcado de datos en protocolo NMEA. La configuración de cada puerto puede realizarse bien vía software o bien a través de los botones y el panel de visualización situados en la parte frontal del receptor.

En la aplicación realizada en esta tesis, el GPS MS750 funciona como receptor con módulo RTK, recibiendo correcciones diferenciales en código y fase desde una estación base situada en la vecindad a través de un equipo de enlace radio. El esquema de conexión se muestra en la figura A.7.

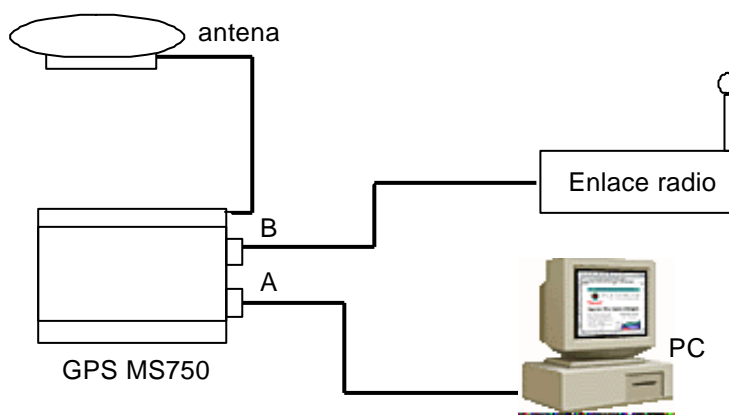


Figura A.7: Esquema de conexión del equipo GPS MS750

En este caso, el puerto *A* se ha conectado a un PC para el volcado de datos NMEA. Por este puerto también se introduce la alimentación (12 a 32 V DC). Las tramas diferenciales enviadas por la estación base son recibidas mediante el enlace radio conectado al puerto *B*. La antena posee un plano de tierra que reduce de forma significativa los efectos negativos de los errores multisenada.

A.7 El protocolo NMEA 0183

NMEA 0183 es un protocolo de comunicación creado por la *National Marine Electronics Association* de los Estados Unidos para permitir el intercambio de información entre equipos de navegación marítima. Actualmente otros equipos, como el sistema GPS, emplean este protocolo estándar. La última publicación de este protocolo es la NMEA 0183 versión 2.1, de 15 de octubre de 1995.

El protocolo NMEA 0183 permite que un transmisor envíe información a través de un cable serie RS232 a uno o más receptores. Las características de la transmisión de datos a través de NMEA 0183 son las siguientes:

- **Velocidad:** 4800 Bd.
- **Bits de datos:** 8.
- **Paridad:** Ninguna.
- **Bits de stop:** 1.

El protocolo NMEA 0183 está compuesto por un conjunto de 50 mensajes, aunque sólo un subconjunto de ellos son los empleados en el sistema GPS. Los mensajes NMEA 0183 no tienen una longitud fija, aunque el número de caracteres máximo permitido, excluyendo el comienzo de trama '\$' y el fin de trama '\r\n' es 79.

La estructura de los mensajes NMEA y el significado de cada uno de los campos es el siguiente:

$\$IDMSG, D1, D2, D3, D4, \dots, Dn * CS\r\n$

- **\$:** Comienzo de mensaje NMEA.
- **ID:** Identificación del emisor. Consta de dos letras que describen la fuente de emisión de la información inmersa en el mensaje. El identificativo del GPS son las letras *GP*.

- **MSG:** Identificación de mensaje. Consta de tres letras que describen el contenido del mensaje y el orden en que aparece la información.
- **,** **:** Las comas se emplean como delimitadores entre campos.
- ***** : El asterisco se utiliza como delimitador.
- **CS:** Campo de *checksum* o de validación de envío de trama. Está formado dos caracteres ASCII.
- **\r\n:** Fin de mensaje NMEA. La finalización de un mensaje NMEA se indica por los caracteres de retorno de carro ($\backslash r$) y fin de línea ($\backslash n$).

El protocolo NMEA permite la posibilidad de que el fabricante de receptores GPS defina mensajes propios que permitan al usuario configurar el equipo. Son los denominados *mensajes propietarios*. Mediante estos mensajes puede seleccionarse el tiempo entre recepción de tramas, cambiar la velocidad en la transmisión de los mensajes NMEA, enmascarar satélites o seleccionar el conjunto de tramas NMEA deseadas. En este caso, el equipo GPS ejerce el papel de receptor en lugar del de emisor.

La estructura de los mensajes propietarios es idéntica a las tramas NMEA estándares salvo en el campo de identificación, que viene definido por la letra *P* junto a tres letras identificativas del fabricante.

A.7.1 Mensajes NMEA 0183 aplicados al GPS

Se presenta a continuación los mensajes NMEA 0183 aplicados al sistema GPS: mensajes GGA, GLL, GSA, GSV, RMC, VTG y ZDA.

Mensaje GGA

El mensaje GGA incluye el tiempo, posición y otros datos del receptor GPS. La estructura de este mensaje es la siguiente (tabla A.1):

$$\text{\$GPGGA,m1,m2,c1,m3,c2,d1,d2,f1,f2,M,f3,M,f4,d3*cc}$$

Mensaje GLL

El mensaje GLL incluye el tiempo y posición. La estructura de este mensaje es la siguiente (tabla A.2):

Campo	Descripción	Rango
m1	Tiempo UTC: horas, minutos y segundos (hhmmss.ss)	00-235959.50
m2	Latitud en grados y decimas de minutos (ddmm.mmmmmm)	0-90
c1	Dirección de la latitud: N=norte, S=sur	'N'/'S'
m3	Longitud en grados y decimas de minutos (dddmm.mmmmmm)	0-180
c2	Dirección de la longitud: E=este, O=oeste	'E'/'W'
d1	Tipo de posición: 1: Absoluto, 2: RTCM	1,2
d2	Número de satélites activos	0-8 ó 0-12
f1	Dilución de la posición horizontal (HDOP)	0-99.9
f2	Altitud en metros sobre el elipsoide de referencia	-30000.00 a +30000.00
M	Unidad en que se mide la altitud de la antena: M (metros)	'M'
f3	Separación geoidal ¹ en metros	±999.99
M	Unidad en que se mide la separación geoidal: M (metros)	'M'
d3	Edad de las correcciones diferenciales (en segundos)	0-999 (modo RTCM)
d4	Identificación de la estación de referencia (modo RTCM)	0-1023
*cc	Checksum	

Tabla A.1: Estructura del mensaje GGA

\$GPGLL,m1,c1,m2,c2,m3,c3*cc

Campo	Descripción	Rango
m1	Latitud en grados y decimas de minutos (ddmm.mmmmmm)	0-90
c1	Dirección de la latitud: N=norte, S=sur	'N'/'S'
m2	Longitud en grados y decimas de minutos (dddmm.mmmmmm)	0-180
c2	Dirección de la longitud: E=este, O=oeste	'E'/'W'
m3	Tiempo UTC de la posición, en horas, minutos y segundos (hhmmss.ss)	00-235959.50
c3	Status: A=Válido, V=Inválido	'A'/'V'
*cc	Checksum	

Tabla A.2: Estructura del mensaje GLL

Mensaje GSA

El mensaje GSA incluye información acerca de los satélites empleados en el cálculo de la posición, los valores del HDOP, VDOP y PDOP y otros parámetros GPS. La estructura de este mensaje es la siguiente (tabla A.3):

\$GPGSA,c1,d1,d2,d3,d4,d5,d6,d7,d8,d9,d10,d11,d12,d13,f1,f2,f3*cc

Mensaje GSV

El mensaje GSV incluye información de cada uno de los satélites empleados en el cálculo de la posición: número del satélite, elevación, azimut y relación señal/ruido. La estructura de este

Campo	Descripción	Rango
c1	Modo: M=Manual, A=Automático	'M'/'A'
d1	Modo: 1=Iniciándose, 2=2D, 3=3D	1-3
d2-d13	Satélites empleados en los cálculos de posición (nulo si no se emplea el canal)	1-32
f1	PDOP	0-9.9
f2	HDOP	0-9.9
f3	VDOP	0-9.9
*cc	Checksum	

Tabla A.3: Estructura del mensaje GSA

mensaje es la siguiente (tabla A.4):

\$GPGSV,d1,d2,d3,d4,d5,d6,.....,f1*cc

Campo	Descripción	Rango
d1	Número total de mensajes	1-3
d2	Número de mensaje	1-3
d3	Número total de satélites a la vista	1-32
d4	Satélite	1-32
d5	Ángulo de elevación en grados	0-90
d6	Azimut en grados	0-359
f1	Relación señal/ruido (dB/Hz)	30.0-60.0
*cc	Checksum	

Tabla A.4: Estructura del mensaje GSV

Mensaje RMC

El mensaje RMC ofrece información sobre la posición GPS y otros parámetros de navegación.

La estructura de este mensaje es la siguiente (tabla A.5):

\$GPRMC,f1,c2,f3,c4,f5,c6,f7,f8,s9,f10,c11*hh

Mensaje VTG

El mensaje VTG ofrece información sobre la orientación y la velocidad de movimiento del GPS.

La estructura de este mensaje es la siguiente (tabla A.6):

\$GPVTG,f1,T,f2,M,f3,N,f4,K*cc

Campo	Descripción	Rango
f1	Tiempo UTC de la posición, en horas, minutos y segundos (hhmmss.ss)	00-235959.50
c2	Status: A=Válido, V=Inválido	'A'/'V'
f3	Latitud en grados y décimas de minutos (ddmm.mmmm)	0-8959.9999
c4	Dirección de la latitud: N=Norte, S=Sur	'N'/'S'
f5	Longitud en grados y décimas de grados (dddmm.mmmm)	0-17959.9999
c6	Dirección de la longitud: E=Este, W=Oeste	'E'/'W'
f7	Velocidad en nudos (nnn.n)	0-999.9
f8	Orientación de la trayectoria en grados (ggg.g)	0-359.9
s9	Fecha en mes, día y año (mmddyy)	
f10	Variación magnética en grados	0.00-99.99
c11	Dirección de la variación: E=Este, W=Oeste	'E'/'W'
hh	Checksum hexadecimal, obtenido al hacer la OR exclusiva de todos los bytes del mensaje sin incluir el \$ ni el *. Como resultado se obtiene un carácter hexadecimal 0-9 o A-F	0-9 ó A-F

Tabla A.5: Estructura del mensaje RMC

Campo	Descripción	Rango
f1	Orientación respecto al norte, en grados (ggg.gg)	0-359.99
T	Norte	'T'
f2	Orientación respecto al norte magnético, en grados (ggg.gg)	0-359.99
M	Norte magnético	'M'
f3	Velocidad en nudos (nnn.nn)	0-999.99
N	Unidades: N=Nudos	'N'
f4	Velocidad en km/h (kkk.kk)	0-999.99
K	Unidades: K=km/h	'K'
*cc	Checksum	

Tabla A.6: Estructura del mensaje VTG

Mensaje ZDA

El mensaje ZDA ofrece información sobre la fecha y zona horaria. La estructura de este mensaje es la siguiente (tabla A.7):

\$GPZDA,f,d1,d2,d3,d4,d5*cc

Mensaje POS

El mensaje POS es un mensaje NMEA propiedad del fabricante *Asthech*. Proporciona información acerca de la posición, orientación y diferentes valores de la dilución de la precisión (DOP). Esta trama ha sido la empleada para los algoritmos de localización. Su estructura es la siguiente (tabla A.8):

Campo	Descripción	Rango
f	Tiempo UTM en horas, minutos y segundos (hhmmss.ss)	0-235959.99
d1	Día (dd)	1-31
d2	Mes	1-12
d3	Año	
d4	Zona horaria: desfase respecto al UTC (shh), s=signo, h=hora	0-±13
d5	Zona horaria: desfase respecto al UTC (smm), s=signo, m=minutos	0-±59
*cc	Checksum	

Tabla A.7: Estructura del mensaje ZDA

\$PASHS,NME,POS,n,d1,m1,m2,c1,m3,c2,f1,d2,m4,d3,d4,f2,f3,f4,f5,d5*cc

Campo	Descripción	Rango
n	Modo de cálculo	
d1	Número de satélites	0-12
m1	Hora en horas, minutos y segundos (hhmmss.ss)	00-235959.50
m2	Latitud en grados y decimas de minutos (dddmm.mmmmmm)	0-180
c1	Dirección de la latitud N=norte, S=sur	'N'/'S'
m3	Longitud en grados y decimas de minutos (dddmm.mmmmmm)	0-180
c2	Dirección de la longitud E=este, W=oeste	'E'/'W'
f1	Altitud en metros sobre el elipsoide de referencia	-30000.00 a +30000.00
d2	Reservado	
m4	Orientación en grados sobre el plano (ttt.t)	0-359.9
d3	Velocidad en el plano en decímetros por segundo (ggg.g)	0-999
d4	Velocidad vertical en decímetros por segundo	-999 a 999
f2	PDOP: dilución de la precisión en posición (pp)	0-99
f3	HDOP: dilución de la precisión horizontal (hh)	0-99
f4	VDOP: dilución de la precisión vertical (vv)	0-99
f5	TDOP: dilución de la precisión del tiempo (tt)	0-99
d5	versión del firmware en ASCII	
*cc	Checksum	

Tabla A.8: Estructura del mensaje POS

Apéndice B

El sistema GPS en posicionamiento autónomo

B.1 Sistema GPS en modo absoluto en presencia de la S/A

Se estudia en esta sección la posibilidad de localizar a un robot móvil en la superficie terrestre empleando un receptor GPS en modo absoluto, antes de que el 1 de mayo de 2000 el Presidente de los Estados Unidos Bill Clinton ordenara el cese de la S/A.

Para ello, se analiza de forma sistemática sobre un conjunto de datos experimentales registrados con anterioridad a esta fecha, la fiabilidad de las medidas variando los diferentes parámetros de configuración del sistema [Pozo-Ruz 98b]. Con objeto de poder establecer una comparativa se ha calculado, en cada uno de los experimentos realizados, las desviaciones típicas en longitud, latitud y altitud (ésta última cuando se posicione en el espacio tridimensional), así como el error circular probable (*CEP*, *Circular Probable Error*) del 50% y del 95% (radio del círculo donde la verdadera posición en el plano estará localizada el 50% y el 95% de las veces respectivamente) y el error cuadrático medio horizontal (rms horizontal), esto es, la raíz cuadrada del promedio de los errores de latitud y longitud al cuadrado.

Para este estudio se ha empleado el receptor GPS GN-74 [Furuno 95] de ocho canales, habida cuenta de que los resultados que se obtengan resultarán válidos para cualquier otro receptor GPS operando en modo absoluto, independientemente de sus prestaciones (número de canales, tiempo de readquisición de satélites, etc.). Esto es debido a que el error de S/A deja insignificante la mejora que en la precisión pueda producir el empleo de receptores GPS más potentes y precisos; estas mejoras son sólo apreciables en ausencia de la S/A.

Al comienzo de cada sesión de trabajo, deben introducirse al receptor GPS GN-74 dos parámetros de configuración del sistema: el índice dinámico y el índice de suavizado. Estos índices hacen ref-

erencia a la influencia que ejerce la frecuencia con que se realizan los cálculos de posicionamiento (índice dinámico) en la exactitud de las medidas (índice de suavizado). Son inversamente proporcionales entre sí, es decir, cuanto mayor sea la frecuencia con que se calcula la posición, menor exactitud se obtiene en las medidas, y viceversa. Los valores que pueden tomar y su significado se muestran en la tabla B.1.

Índice de suavizado	Índice dinámico	Significado
1	3	Mayor frecuencia y menor precisión
2	2	Compromiso entre frecuencia y precisión
3	1	Menor frecuencia y mayor precisión

Tabla B.1: Valores de índice de suavizado y dinámico

Crane [Crane 95] recomienda emplear una configuración que otorgue mayor peso a la exactitud en las medidas realizadas en decremento de la velocidad con que éstas se calculan, cuando existan menos de cuatro satélites para los cálculos de posicionamiento (posicionamiento bidimensional). Si al comienzo de una sesión el receptor GPS se encuentra en estado de inicialización, es decir, captando la señal de los satélites sin haber logrado aún posicionarse, es preferible emplear un índice de suavizado y dinámico igual a 2. Sin embargo, si se disponen de más sensores aparte del GPS para el cálculo de la posición, se puede reducir la exigencia de precisión en las medidas, adoptando la primera configuración de la tabla B.1.

El sistema GPS emplea un mínimo de cuatro satélites para el cálculo de su posición en el espacio, es decir, de la longitud, latitud y altitud del lugar de la Tierra en que la antena del receptor se sitúa. Si sólo se requiere conocer la latitud y la longitud puede emplearse un mínimo de tres satélites. El cálculo de la posición se realiza en base a principios geométricos, por ello, determinadas configuraciones de los satélites respecto al observador, pueden originar grandes errores. La dilución de la precisión (*DOP*, *Dilution of Precision*) es un factor adimensional que indica si las medidas obtenidas son o no precisas en función de la geometría de los satélites utilizados en los cálculos. Existen varios tipos de índices DOP (capítulo 3). En la experimentación que a continuación se presenta se analizan los siguientes:

- DOP horizontal (*HDOP*, *Horizontal Dilution of Precision*), (sobre el plano).
- DOP vertical (*VDOP*, *Vertical Dilution of Precision*), (altura).
- DOP de posición (*PDOP*, *Position Dilution of Precision*), que resulta de la combinación de los dos anteriores.

Para el caso del receptor GN-74, las medidas serán mejores cuanto más se acerque el valor del PDOP a la unidad.

Muchos receptores, entre los que se encuentra el receptor GN-74, permiten introducir un PDOP umbral, de forma que si se supera éste, el receptor posicionará en modo bidimensional, es decir, sólo ofrecerá valores en latitud y longitud (HDOP). Esto es debido a que la variación de la altitud en cada instante es más acusada que la variación en el plano (latitud y longitud), ya que para su cómputo únicamente existirán satélites sobre el receptor y no a su alrededor como para el caso del posicionamiento en el plano. Así, la dilución vertical (VDOP) es de 1.5 a 2 veces menos precisa que la horizontal.

El receptor GN-74 permite ignorar la señal de determinados satélites utilizando como discriminante bien el ángulo de elevación de los satélites candidatos para ser empleados en los cálculos o bien descartar directamente los satélites.

La señal emitida por los satélites con un ángulo de elevación pequeño es susceptible de sufrir rebotes antes de llegar al receptor, quedando degradada. El parámetro de enmascaramiento por ángulo de elevación permite ignorar, en el seguimiento o en el posicionamiento, las señales procedentes de satélites cuyo ángulo de elevación sea menor a un valor prefijado. El receptor GPS GN-74 proporciona por defecto un valor de 5 grados para ambos umbrales.

Otras veces, sin embargo, resulta interesante descartar la señal emitida por un determinado satélite, lo que se consigue a través del enmascaramiento directo por número de satélite. El usuario introduce el número del satélite (de 1 a 32) que desea que no sea empleado en los cálculos de posicionamiento, pudiendo enmascarar hasta un máximo de ocho satélites de forma simultánea.

B.1.1 Experimentos en estático

Se muestra a continuación una colección de experimentos realizados con el receptor GPS GN-74 que estudia la fiabilidad de las medidas obtenidas en modo absoluto y en presencia de la S/A. Los parámetros que se han analizado son los siguientes:

- Índice de suavizado y dinámico.
- Geometría de los satélites empleados en los cálculos: parámetro PDOP.
- Umbral de la dilución de la precisión geométrica en la posición (umbral PDOP).
- Enmascaramiento por ángulo de elevación de los satélites y enmascaramiento directo de satélites.
- Comparación con otros receptores GPS.

	Índice suavizado: 1 Índice dinámico: 3	Índice suavizado: 2 Índice dinámico: 2	Índice suavizado: 3 Índice dinámico: 1
Desv. típ. latitud (m.)	24.28	22.24	18.44
Desv. típ. longitud (m.)	30.10	22.89	22.65
Desv. típ. altitud (m.)	45.78	35.02	33.76
rms horizontal	38.67	31.92	29.2
CEP 50%	32.1	25	23.4
CEP 95%	67.8	65.9	52.9
Vertical 95%	95.2	70.5	54.9

Tabla B.2: Medidas de precisión en función de los diferentes pares de índices de suavizado y dinámico

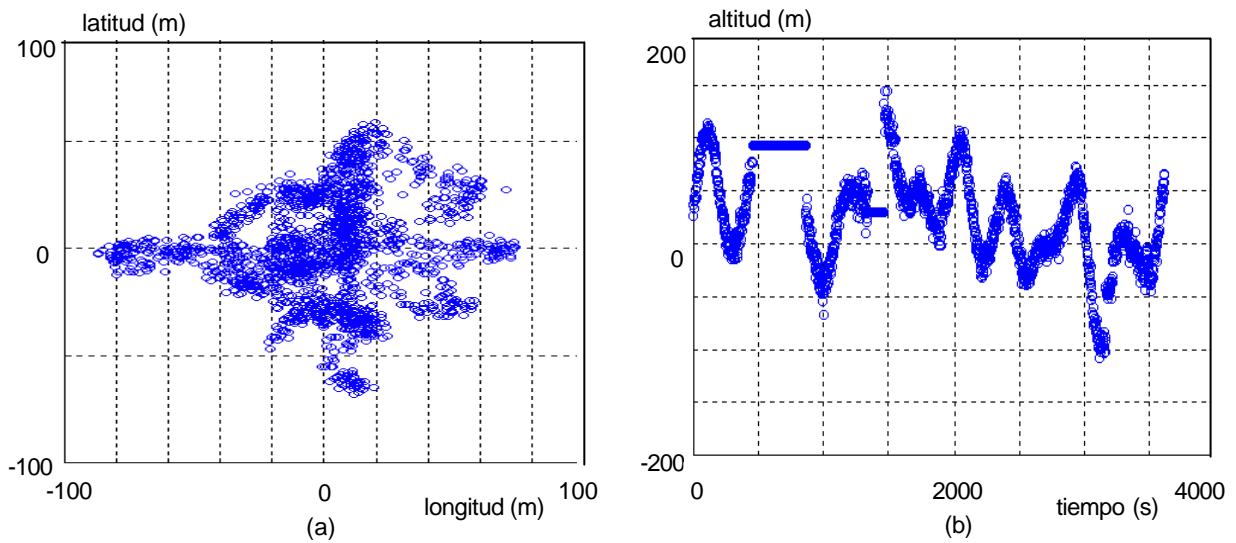


Figura B.1: Índice de suavizado 1 e índice dinámico 3: a) Plano, b) Altitud

Influencia de los índices de suavizado y dinámico

Se ha realizado la toma de datos con las tres posibles combinaciones de índices de suavizado y dinámico, según se describe en la tabla B.1. Los datos han sido registrados cada dos segundos durante una hora y con el receptor en reposo. Con el fin de normalizar las medidas se ha restado a cada valor la media del conjunto de valores obtenidos (la mejor estimación), correspondiendo dicha media al origen de coordenadas.

Así, la figura B.1a y la figura B.1b representan, respectivamente, las posiciones en el plano (longitud frente a latitud, en m.) y la altitud (en m.) respecto al tiempo, para un índice de suavizado igual a 1 y un índice dinámico igual a 3. La figura B.2a y la figura B.2b representan las mismas variables que en caso anterior, pero para un índice dinámico y de suavizado igual a 2. Por último, la figura B.3a y la figura B.3b corresponden a un índice de suavizado igual a 3 y un índice dinámico igual a 1. En la tabla B.2 se muestran las desviaciones típicas de las medidas en cada uno de los tres casos, así como el rms horizontal y el CEP del 50% y 95%.

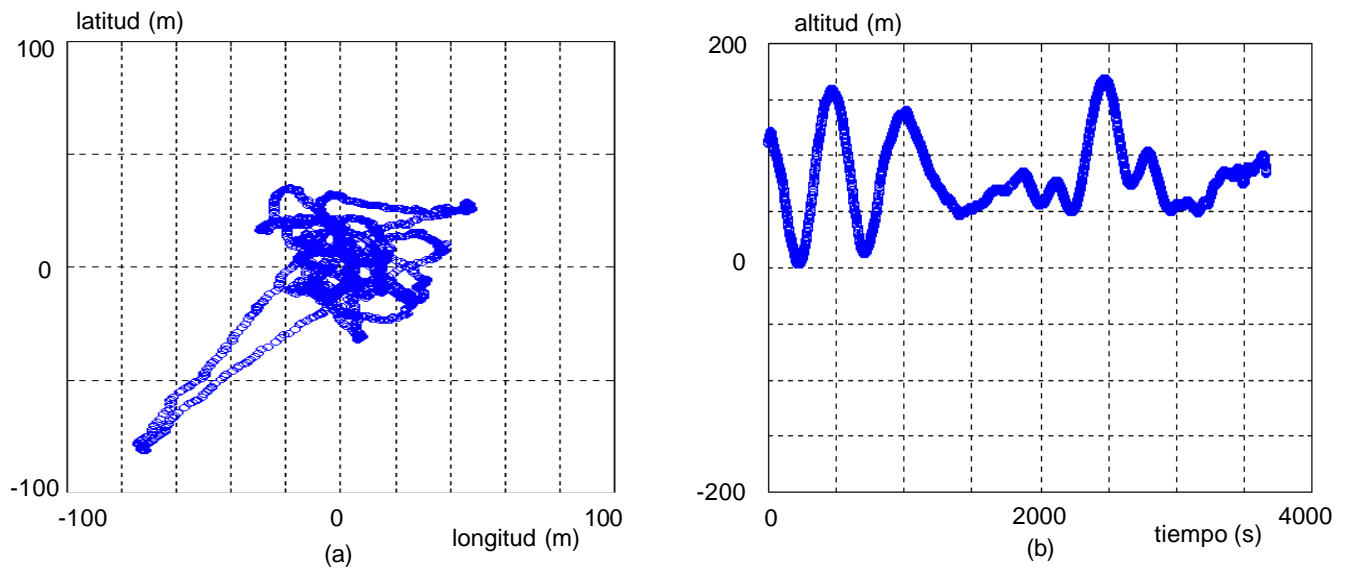


Figura B.2: Índice de suavizado 2 e índice dinámico 2: a) Plano, b) Altitud

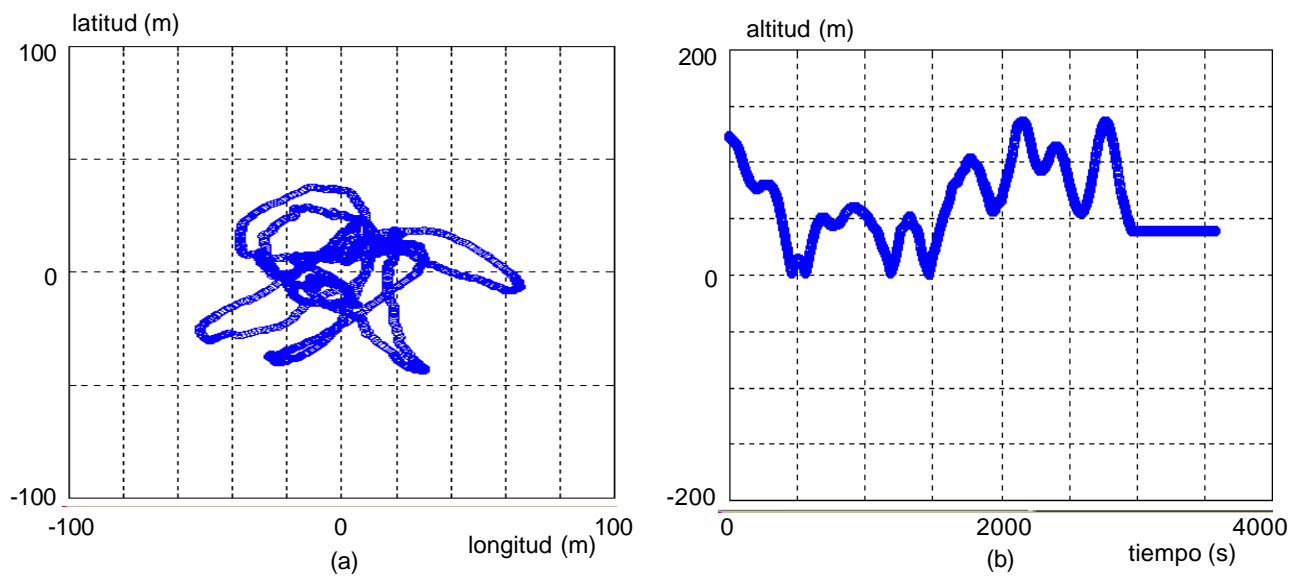


Figura B.3: Índice de suavizado 3 e índice dinámico 1: a) Plano, b) Altitud

Tanto de la figura B.1, figura B.2, figura B.3, como de la tabla B.2 se desprende que los errores son mayores conforme aumenta la frecuencia en la toma de datos (índice dinámico) en decremento de la precisión con la que éstas se calculan (índice de suavizado), tal y como cabía esperar. Así, por ejemplo, cuando se emplea un índice de suavizado igual a 3 y un índice dinámico igual a 1, el rms horizontal y el vertical (que coincide con la desviación típica en altitud) disminuyen en un 24.4% y en un 26.25%, respectivamente, en relación a los obtenidos con un índice dinámico igual a 3 y uno de suavizado igual a 1. Mejoras similares se deducen tomando las otras medidas de error mostradas en la tabla B.2.

Influencia de la geometría de los satélites: parámetro y umbral PDOP

A continuación se analizan las pruebas llevadas a cabo para mostrar el grado de influencia del número de satélites y de la geometría de los mismos en los cálculos de la posición, realizándose la cuantificación a través del parámetro PDOP. Se pretende conocer para qué valores de PDOP las medidas resultan fiables y a qué geometría de los satélites corresponde.

La figura B.4 muestra la evolución del PDOP en los primeros 1000 segundos, así como el número de satélites empleados en cada instante en los cálculos de los datos representados en la figura B.3 (máxima precisión y mínima frecuencia en la toma de datos). El valor del PDOP cambia de forma instantánea respecto a su valor anterior cuando se produce la pérdida de alguno de los satélites utilizados en el cálculo. Así, como se observa en la figura B.4, a los 159 segundos del comienzo de la toma de datos, se produce un cambio brusco en el PDOP que pasa de 3 a 5.4. Esta variación es debida a la pérdida de un satélite por parte del receptor en el cálculo de las posiciones, que pasa de posicionar con 5 satélites a posicionar con 4. De igual forma, si el receptor aumenta el número de satélites con los que posiciona, el PDOP disminuye (figura B.4).

Un valor de PDOP alto indica que los satélites poseen una geometría inadecuada respecto al receptor. Una geometría desfavorable es aquella donde los ángulos relativos entre los satélites son pequeños. Considérese dos instantes de tiempo diferentes en que el receptor posiciona con un total de cinco satélites. La figura B.5a y la figura B.5b muestran la geometría de los satélites en el espacio (ángulo de elevación y acimut) en relación al receptor GPS en uno y otro caso. El centro de cada circunferencia corresponde a la posición del receptor GPS.

En dichas gráficas, cuanto menor sea el radio de la circunferencia concéntrica donde se sitúa el satélite, mayor será su elevación, correspondiendo el centro de las circunferencias concéntricas a un ángulo de elevación de 90° , esto es, un satélite aquí situado se encontraría justo encima del receptor. Por el contrario, cuanto mayor sea el radio, más bajo en el horizonte se encontrará el satélite. Se observa que en el primer caso, que corresponde a un PDOP de valor 3, los satélites

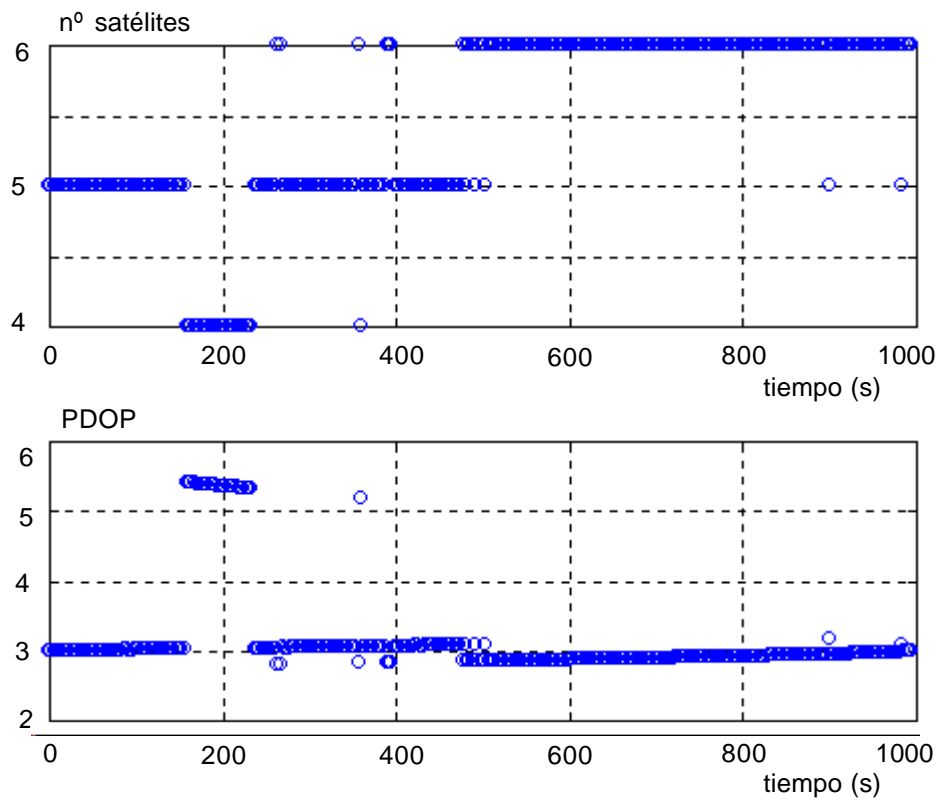


Figura B.4: Evolución del número de satélites y del PDOP en el tiempo

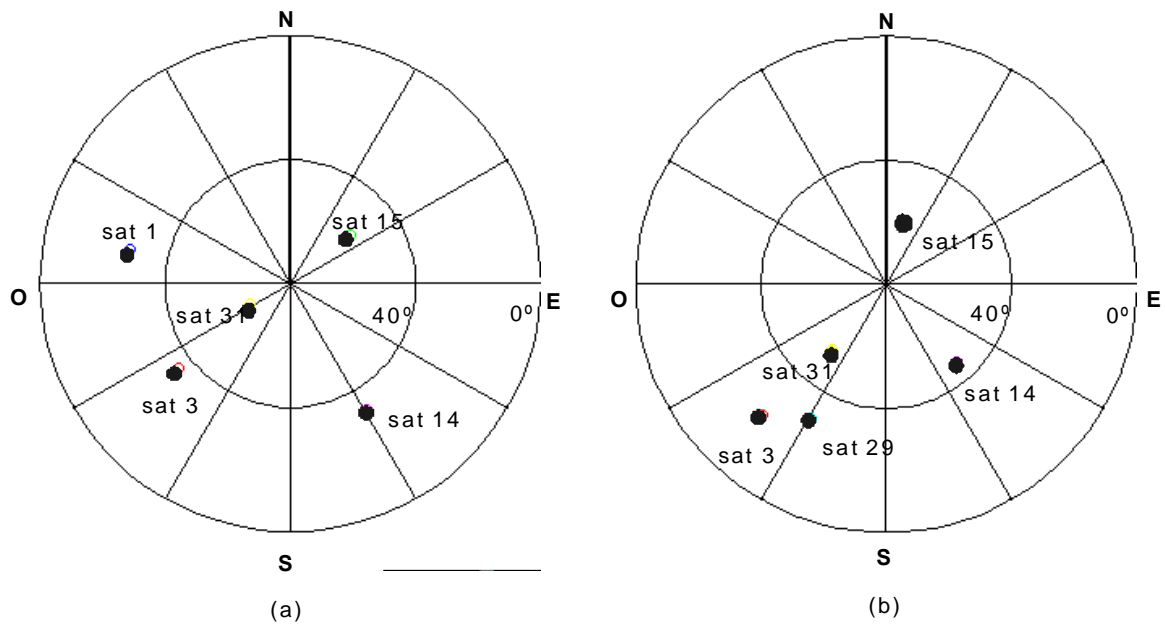


Figura B.5: Constelación de satélites: a) PDOP: 3, b) PDOP: 4.3

se encuentran mejor distribuidos respecto del receptor que en segundo caso, que tiene un PDOP igual a 4.3.

El receptor GPS GN-74 permite introducir un umbral PDOP de forma que, si la geometría de los

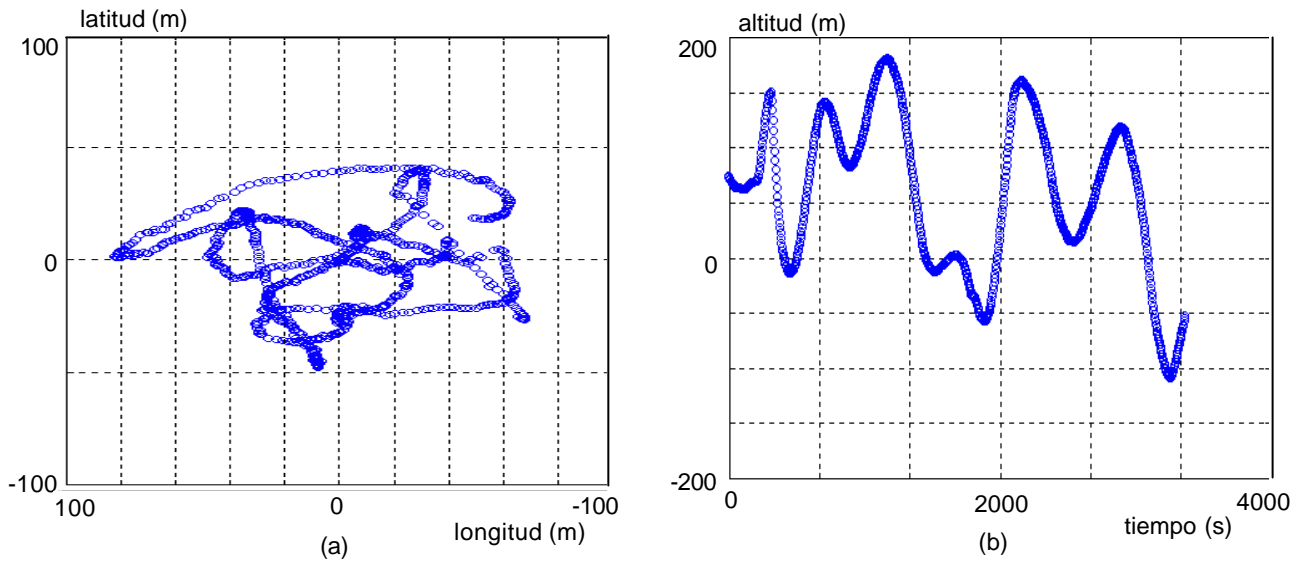


Figura B.6: PDOP umbral igual a 6: a) Plano, b) Altitud

satélites determina un valor PDOP mayor al umbral prefijado, el receptor pasará a posicionarse en modo bidimensional (2D, latitud y longitud). Nótese que un umbral PDOP igual a cero equivale a medidas en el plano, ya que el índice PDOP corresponde siempre a un valor positivo. De esta forma, si el umbral de PDOP es grande, el receptor GPS se posicionará, siempre que disponga de un número de satélites suficiente, en tres dimensiones (3D).

En las siguientes experimentaciones se estudia cómo influye el umbral PDOP en las medidas obtenidas. Se trata de decidir si resulta preferible el posicionamiento en el plano (latitud y longitud), o por el contrario, es mejor el posicionamiento tridimensional (latitud, longitud y altitud). La toma de datos se realiza de forma estática, a lo largo de una hora a razón de una posición cada dos segundos. Las medidas de latitud y longitud se han normalizado respecto a la media del conjunto de datos. Los valores de índice de suavizado y dinámico son 3 y 1, respectivamente.

A continuación se presentan las medidas obtenidas en latitud, longitud y altitud según diferentes valores del umbral PDOP. La figura B.6a y la figura B.6b muestran las posiciones calculadas por el receptor GPS con un PDOP umbral de valor 6; la figura B.7a y la figura B.7b para un PDOP umbral igual a 2 y la figura B.8 para un PDOP umbral de valor 0. Las desviaciones típicas en longitud, latitud y altitud, el rms horizontal, el CEP del 50% y del 95% y el vertical del 95% de cada una de las pruebas se muestran en la tabla B.3.

Las medidas obtenidas con un valor de PDOP umbral igual a 2 mejoran a las obtenidas con otros umbrales, siempre y cuando se ignore la coordenada de altitud. Así, el rms horizontal con un PDOP umbral de 2 mejora en un 33.12% respecto al umbral 6, y en un 9.83% respecto al umbral 0. Estas mejoras son más significativas en el caso del CEP del 50%: 36.23% respecto

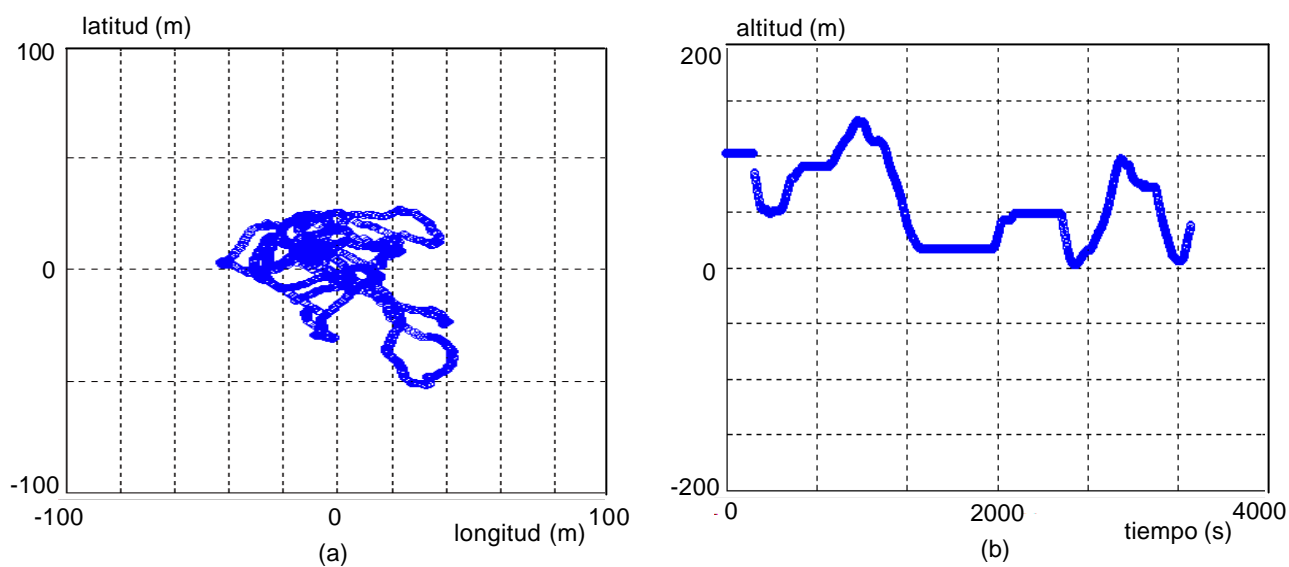


Figura B.7: PDOP umbral igual a 2: a) Plano, b) Altitud

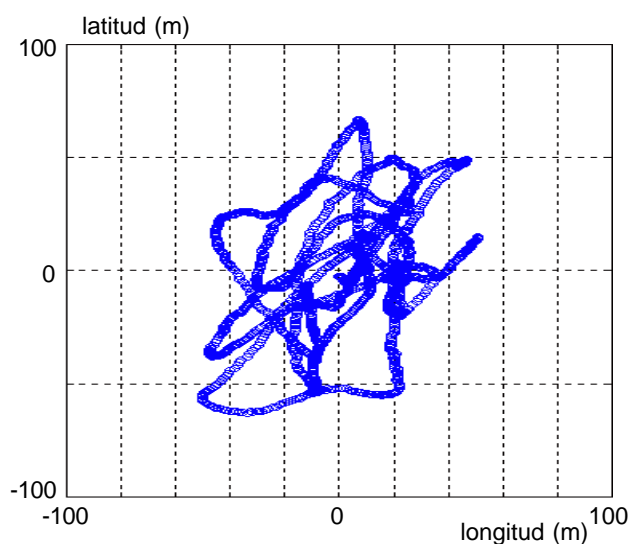


Figura B.8: PDOP umbral igual a 0: Posicionamiento en el plano

	PDOP umbral: 6	PDOP umbral: 2	PDOP umbral: 0
Desv. típ. latitud (m)	21.79	18.16	29.24
Desv. típ. longitud (m)	35.01	20.76	22.94
Desv. típ. altitud (m)	71.49	31.81	0
rms horizontal	41.24	27.58	37.16
CEP 50%	36.7	23.4	31.5
CEP 95%	69.4	47.4	63.6
Vertical 95%	103.5	56.3	0

Tabla B.3: Medidas de precisión según diferentes valores de PDOP umbral

	Umbral elev.: 10°	Umbral elev.: 20°	Umbral elev.: 40°
Desv. típ. latitud (m)	25.46	30.18	28.2
Desv. típ. longitud (m)	24.03	25.63	35.66
Desv. típ. altitud (m)	35	39.59	45.46
rms horizontal	41.24	27.58	37.16
CEP 50%	28.2	26.8	35.6
CEP 95%	58.1	79.4	81.8
Número de satélites	6	5	3

Tabla B.4: Medidas de precisión con diferentes umbrales de elevación

al umbral PDOP 6 y 25.71% respecto al umbral PDOP 0. En el caso del CEP del 95%, el considerar un PDOP umbral igual a 2 aumenta la exactitud en un 31.7% y un 25.47% respecto a los umbrales 6 y 0, respectivamente.

En la figura B.7b, que representa la evolución de la altitud cuando el umbral de PDOP es 2, los intervalos de tiempo en los cuales esta coordenada permanece constante corresponden a un posicionamiento bidimensional, es decir, a un valor de PDOP mayor a dos. Esto es debido a que cuando la geometría de los satélites provoca un aumento en el valor del PDOP, en otras palabras, la exactitud en las medidas es menor, se ignora en los cálculos la coordenada susceptible de mayor error, esto es, la altitud.

Enmascaramientos

El enmascaramiento de satélites por parte del sistema puede realizarse en función de determinados parámetros: ángulo de elevación de los satélites, relación señal/ruido o enmascaramiento directo. El enmascaramiento por ángulo de elevación de los satélites permite ignorar en el cálculo de la posición aquellos satélites que poseen una elevación inferior a una previamente fijada. Cuanto mayor sea este umbral, los satélites que intervienen en los cálculos se encontrarán más elevados respecto al receptor.

Para observar la influencia de este parámetro en la precisión de las medidas, se ha llevado a cabo la toma de datos en 2D (PDOP umbral igual a 0), realizando una medida cada dos segundos durante una hora, con índice dinámico 1 y un índice de suavizado 3, esto es, con la mayor precisión posible. Los valores de latitud y longitud se representan normalizados respecto de la media del conjunto de datos. La figura B.9a, la figura B.9b y la figura B.9c muestran las posiciones en el plano obtenidas con valores umbrales de elevación de 10°, 20° y 40°, respectivamente. En la tabla B.4 quedan reflejadas las desviaciones típicas, el rms horizontal y el CEP del 50% y del 95% obtenidos bajo las condiciones anteriores, así como el número de satélites que han intervenido en el cálculo de la posición.

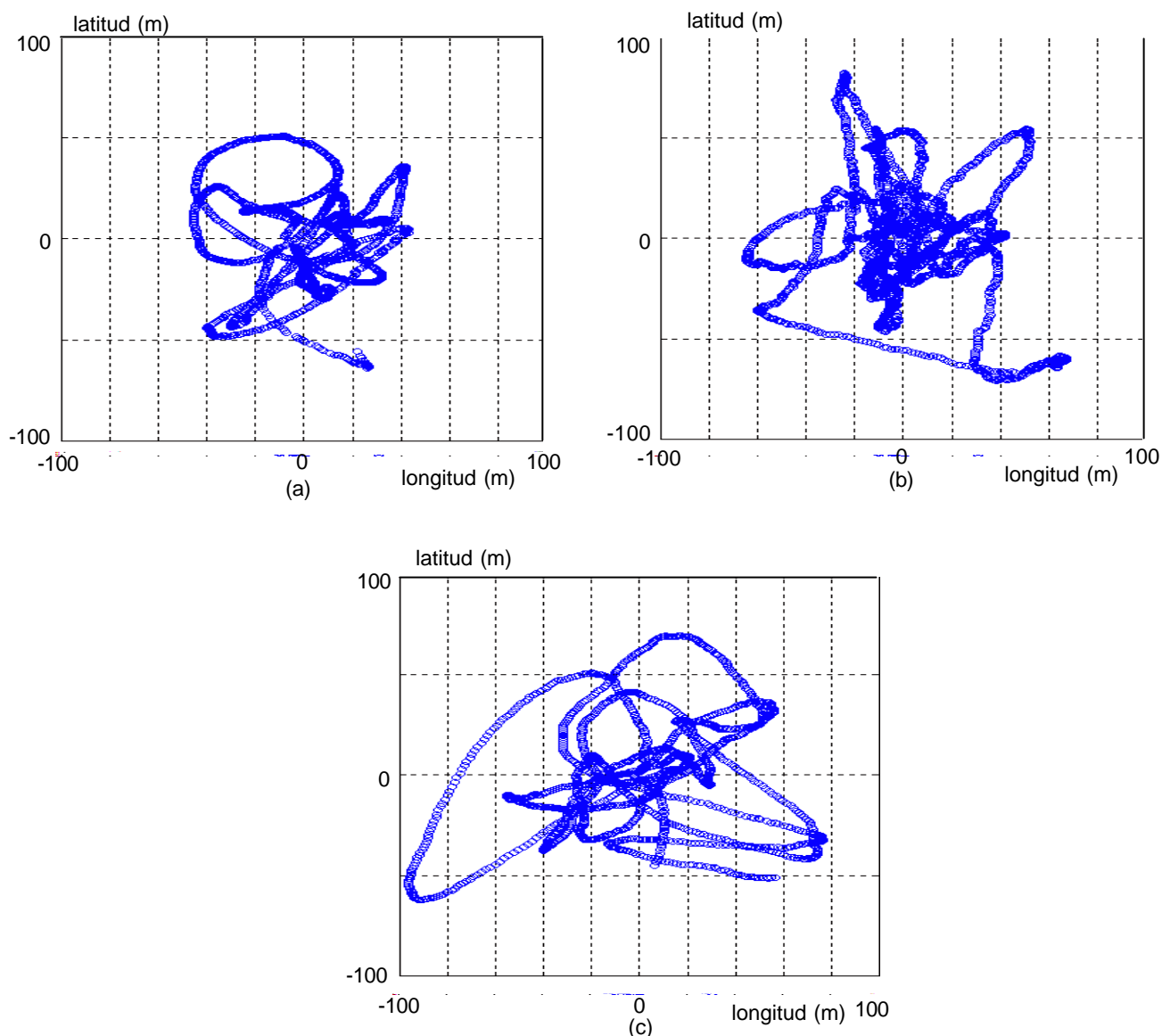


Figura B.9: Posicionamiento en el plano con umbrales de enmascaramiento por ángulo de elevación: a) 10° , b) 20° , c) 40°

Debido a que el umbral de elevación ignora aquellos satélites que posean un ángulo de elevación inferior al especificado, cuanto mayor sea el umbral de enmascaramiento menor será el número de satélites utilizados. Así, como muestra la tabla B.4, para un umbral de elevación de 10° , fueron 6 los satélites que intervinieron en los cálculos frente a los 3 satélites captados para un umbral igual a 40° . Además, cuanto más elevados se encuentren los satélites, el ángulo relativo entre ellos será menor (peor geometría), lo que origina una mayor incertidumbre en el cálculo de la posición. Por tanto, conforme el umbral de elevación aumenta, las medidas se ven afectadas por un mayor error, como se desprende de la tabla B.4.

El receptor GPS GN-74 permite ignorar en el posicionamiento las señales de aquellos satélites especificados por el usuario a través de su número identificativo (de 1 a 32). El enmascaramiento

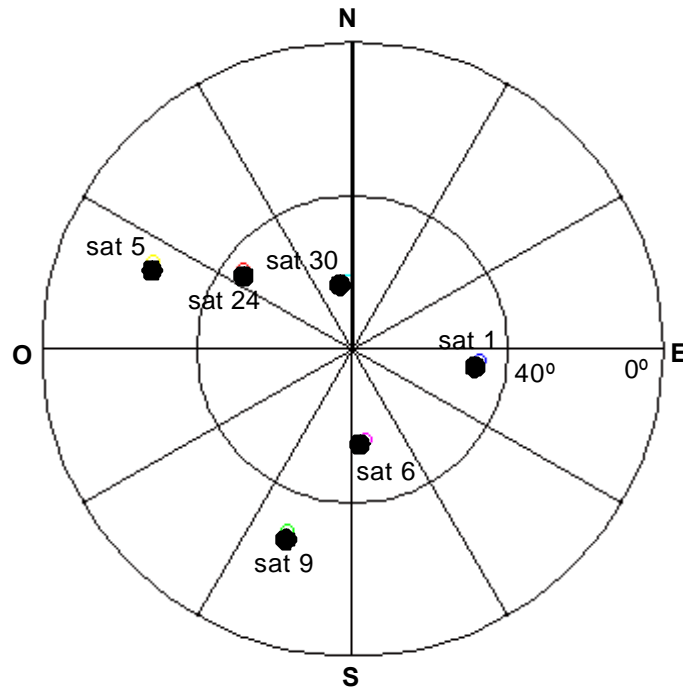


Figura B.10: Constelación de los seis satélites en el campo de visión del receptor

directo puede emplearse para impedir la entrada o salida de satélites diferentes a los que se están utilizando en la localización, eliminando cualquier cambio que pudiera degradar las medidas. Además, la precisión de los datos aumenta significativamente si se elige de forma óptima el conjunto de satélites. Una buena estrategia de selección sería la de escoger, de entre el conjunto de satélites a la vista, el subconjunto que ofrezca el menor índice PDOP. Para ello, se ha llevado a cabo un experimento que consiste en calcular el PDOP que el receptor GPS obtendría en caso de posicionar empleando grupos de tres, cuatro, cinco y seis satélites de entre los seis que se encuentran en ese instante en su campo de visión. La figura B.10 muestra la constelación de los seis satélites que el receptor emplea para realizar los cálculos de posicionamiento. En la tabla B.5 se representan los valores de PDOP obtenidos al posicionar con cada grupo de satélites.

En los experimentos, el receptor GPS permanece en reposo, el índice de suavizado es 3, el índice dinámico 1, el umbral PDOP vale 0 (posicionamiento en el plano) y el umbral de elevación de los satélites es de 15°. Nótese que el GPS no es capaz de proporcionar una medida de la posición cuando el PDOP es mayor que 10, ya que éste es el máximo valor admisible para la dilución de la precisión geométrica.

La figura B.11a muestra las medidas en longitud y latitud cuando se posiciona empleando los satélites 1, 5, 9 y 30, que ofrecen el mejor índice de PDOP de entre los obtenidos al realizar los cálculos con sólo cuatro satélites (tabla B.5), mientras que la figura B.11b refleja las medidas en longitud y latitud al posicionar con el grupo de cuatro satélites que ha proporcionado el peor

Grupos de 3 satélites										
Satélites	1-5-6	1-5-9	1-5-24	1-5-30	1-6-9	1-6-24	1-6-30	1-9-24	1-9-30	1-24-30
PDOP	2.69	1.84	> 10	5.76	> 10	3.36	2.90	1.70	1.91	5.64
Satélites	5-6-9	5-6-30	5-9-24	5-9-30	5-24-30	6-9-24	6-9-30	6-24-30	9-24-30	5-6-24
PDOP	2.32	3.52	> 10	3.22	9.23	2.20	2.84	4.58	2.93	8.93

Grupos de 4 satélites									
Satélites	1-5-6-9	1-5-6-24	1-5-6-30	1-5-9-24	1-5-9-30	1-5-24-30	1-6-9-24	1-6-9-30	
PDOP	4.95	4.65	5.83	5.28	1.63	4.87	1.75	1.91	
Satélites	1-6-24-30	1-9-24-30	5-6-9-24	5-6-9-30	5-6-24-30	5-9-24-30	6-9-24-30		
PDOP	2.10	1.65	2.15	1.91	2.26	2.24	2.81		

Grupos de 5 satélites						
Satélites	1-5-6-9-24	1-5-6-9-30	1-6-9-24-30	1-5-9-24-30	1-5-6-24-30	5-6-9-24-30
PDOP	1.51	1.48	1.46	1.51	2.15	1.72

Grupos de 6 satélites	
Satélites	1-5-6-9-24-30
PDOP	1.37

Tabla B.5: Índice PDOP en función del número de satélites empleados para posicionar

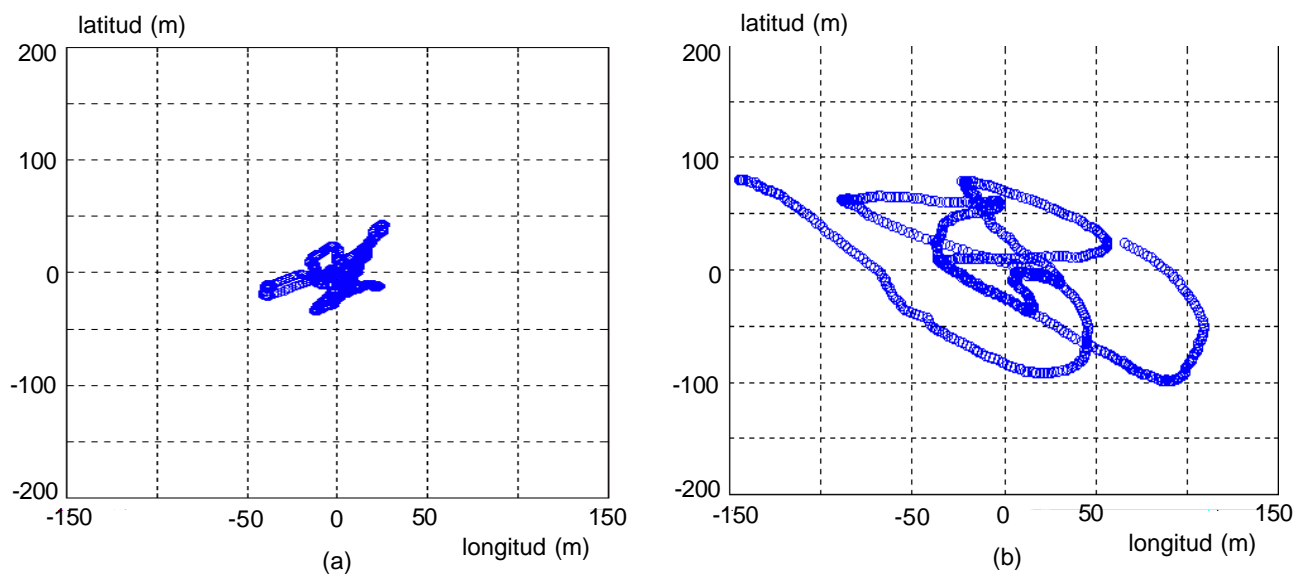


Figura B.11: Latitud y longitud posicionando con cuatro satélites: a) menor PDOP, b) mayor PDOP

PDOP: satélites 1, 5, 6 y 30 (tabla B.5). En ambos casos, las medidas se han registrado durante 30 minutos, con un intervalo de dos segundos entre medidas. Las desviaciones típicas en latitud y longitud, el rms horizontal y el CEP del 50% y del 95% de los datos presentados en la figura B.11 se recogen en la tabla B.6.

Si se comparan las precisiones obtenidas con los valores de PDOP anteriores, se observa que

	Peor PDOP: 5.83	Mejor PDOP: 1.63
Desv. típ. latitud (m)	49.95	17.96
Desv. típ. longitud (m)	53.31	15.64
rms horizontal	73.03	24.01
CEP 50%	60.3	19.2
CEP 95%	132.5	44.7

Tabla B.6: Medidas de precisión con el mejor y peor PDOP empleando cuatro satélites

el rms horizontal, CEP 50% y CEP 95% para un PDOP de 1.63 (mejor PDOP obtenido para 4 satélites) mejoran en un 67.13%, 68.16% y 66.26% respectivamente respecto al PDOP de 5.83 (peor PDOP obtenido para 4 satélites) (tabla B.5). Resultados similares se obtienen si se calculan las precisiones para otro conjunto con distinto número de satélites. Se deduce así que la precisión es mayor cuanto menor es el valor PDOP.

Comparación entre receptores GPS en modo absoluto

Los datos obtenidos con el receptor GPS GN-74 se comparan con los calculados con otros receptores GPS en modo absoluto en situaciones estáticas y en presencia de la S/A. Como receptores GPS se han empleado tres de mayores prestaciones al GPS GN-74: los modelos G8 [Ashtech 98], 3100LR12 [Fugro 00] y Z12 [Ashtech 96b], y otro de prestaciones similares: el GPS ACEII [Trimble 98a]. Una descripción de los mismos se recoge en el apéndice A.

En cada una de las experimentaciones, se ha registrado una medida cada segundo durante una hora estando cada GPS en reposo y posicionando en modo absoluto. Los receptores están configurados de forma que posicionan en 3D y con todos los satélites que posea dentro de su campo de visión. Los datos obtenidos en latitud y longitud en uno y otro caso se han normalizado respecto de la media del conjunto de medidas.

La figura B.12a y la figura B.12b muestran las medidas en el plano y la evolución de la altitud con el tiempo respectivamente obtenidas por el receptor GPS G8, la figura B.13a y la figura B.13b para el receptor GPS 3100LR12, la figura B.14a y la figura B.14b para el GPS Z12 y la figura B.15a y B.15b para el GPS ACEII. Las desviaciones típicas, el rms horizontal, el CEP del 50% y del 95% y el valor vertical del 95% quedan reflejados en la tabla B.7.

Los receptores GPS empleados en este experimento poseen prestaciones diferentes, tales como diferente número de canales. Así, se han utilizado receptores de ocho canales (ACEII y G8) y de doce canales (3100LR12 y Z12). El número de canales de que dispone cada receptor GPS influye en la precisión que éste puede alcanzar, pues indica el máximo número de satélites que pueden intervenir en el cálculo de cada posición. Cuantos más satélites emplee en los cálculos, más precisas serán las medidas. Sin embargo en modo absoluto, esto es, sin el empleo de correcciones

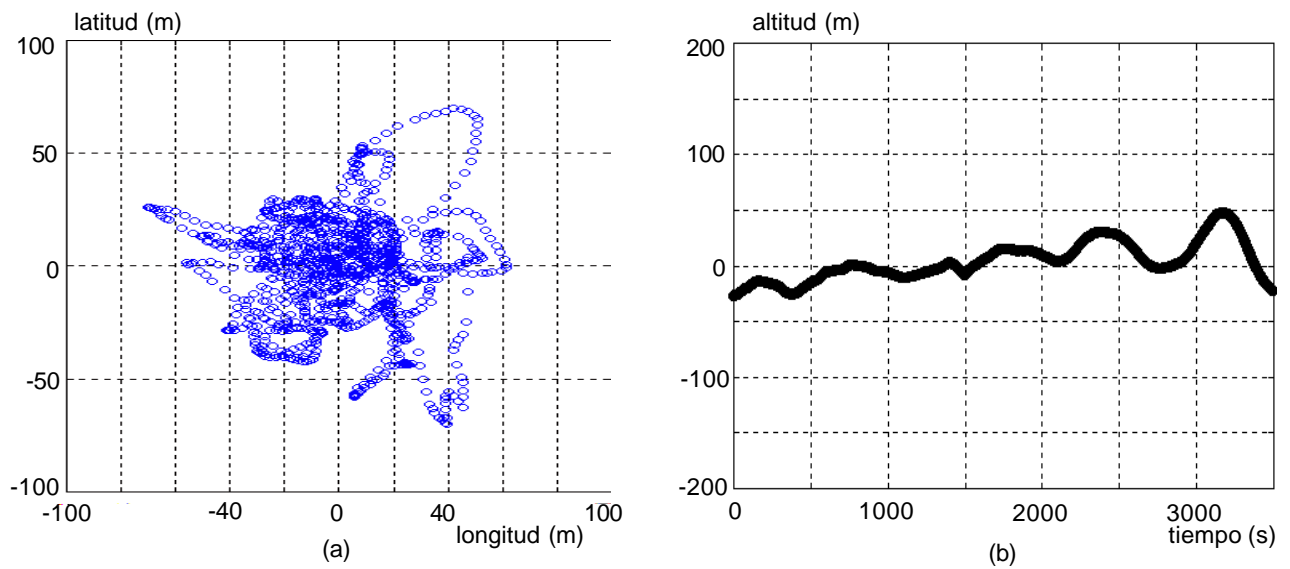


Figura B.12: Posiciones con el receptor G8: a) Plano, b) Altitud

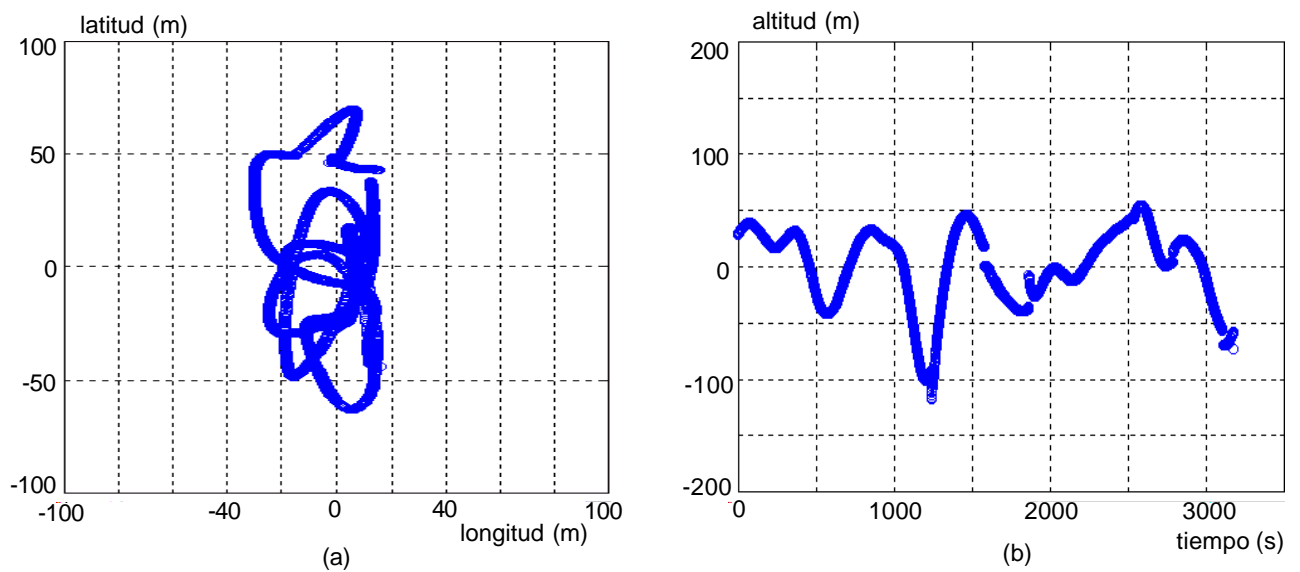


Figura B.13: Posiciones con el receptor 3100LR12: a) Plano, b) Altitud

	GPS G8	GPS 3100LR12	GPS Z12	GPS ACEII
Desv. típ. latitud (m)	23.61	32.90	29.29	24.15
Desv. típ. longitud (m)	25.63	12.90	20.19	26.2
Desv. típ. altitud (m)	22.67	34.17	55.10	23.10
rms horizontal	33.40	35.54	35.57	33.93
CEP 50%	24.5	25.6	25	25.1
CEP 95%	53.4	51.7	54.5	50.2
Vertical 95%	34.9	41.7	79.2	40.35

Tabla B.7: Medidas de precisión con diferentes receptores GPS en modo absoluto (S/A activa)

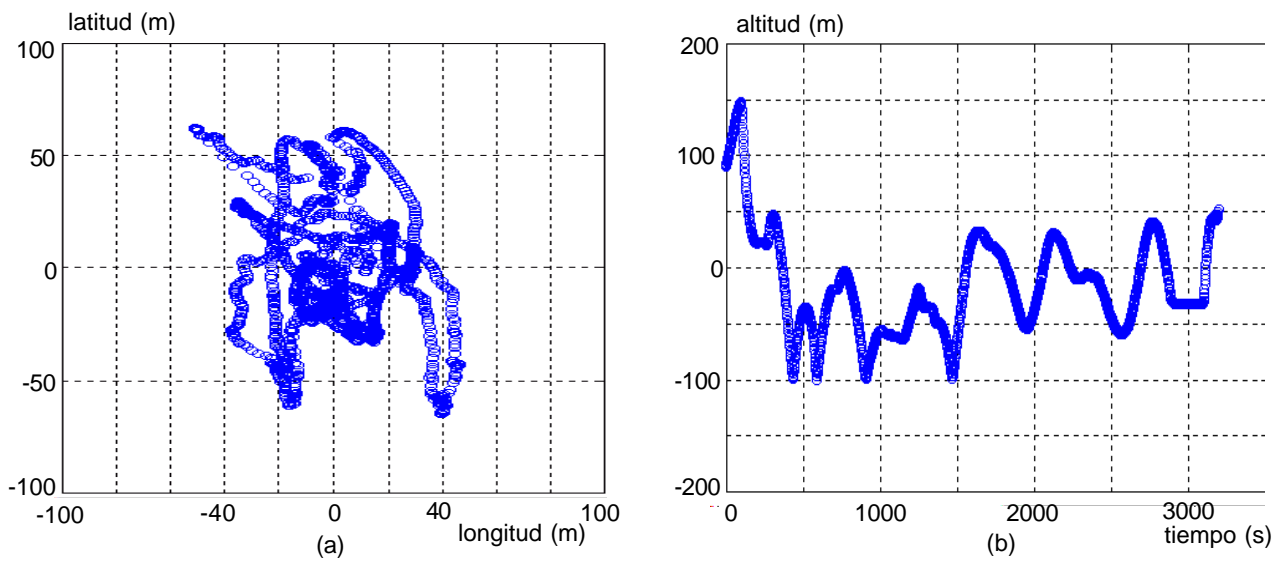


Figura B.14: Posiciones con el receptor Z12: a) Plano, b) Altitud

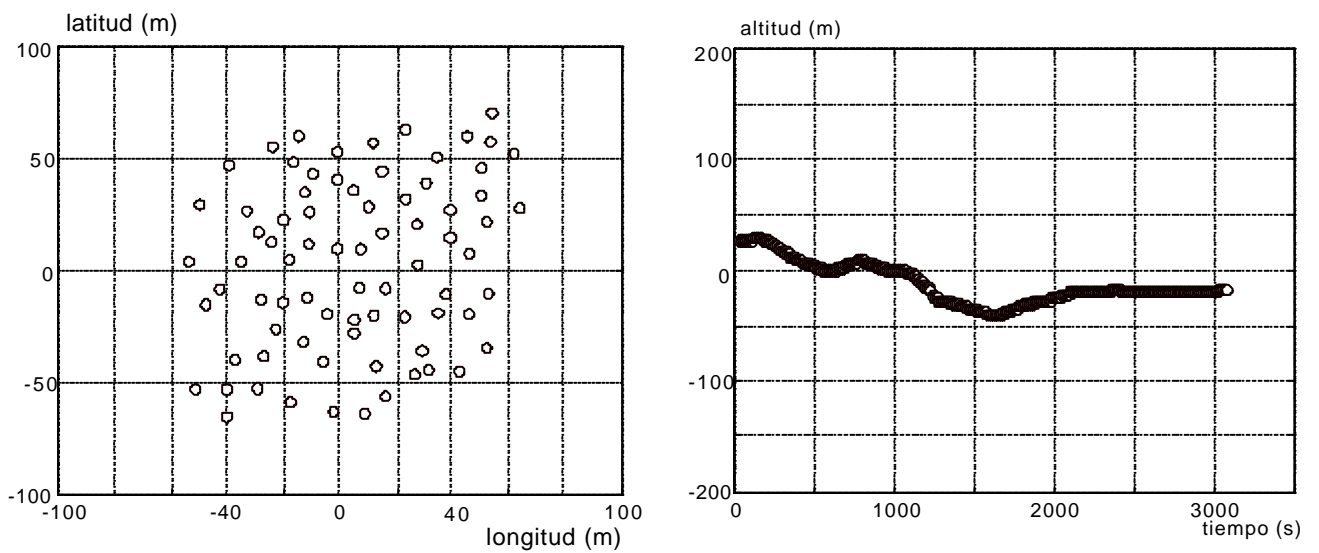


Figura B.15: Posiciones con el receptor ACEII: a) Plano, b) Altitud

diferenciales, y estando la S/A activa, esta característica resulta irrelevante, pues el amplio rango de este error introducido intencionalmente en la señal civil impide apreciar cualquier mejora que las prestaciones de los modernos equipos puedan ofrecer.

Así, como se observa en la tabla B.7, los errores en cada uno de los receptores son del mismo orden para los parámetros de rms, y CEP del 50% y del 95%, independientemente de las características de cada equipo, y similares a las obtenidas en los anteriores experimentos con el receptor GPS GN-74. Únicamente en la coordenada de altitud, que es precisamente la susceptible de mayor error, puede apreciarse un mayor rango de variación. Las desviaciones típicas en longitud y latitud presentan una mayor variabilidad.

De los datos extraídos de la tabla B.7 puede deducirse, por tanto, que aún empleando equipos capaces de proporcionar medidas de calidad, la precisión que se obtiene con ellos en modo absoluto resulta muy pobre. Así, en el caso más favorable, se han obtenido errores de ± 50 m, siendo esta precisión insuficiente para la tarea de posicionamiento y localización de vehículos en determinados entornos. Sin embargo, sí podría emplearse en otras aplicaciones, como pueden ser la navegación de barcos o la localización de vehículos en regiones remotas como desiertos.

B.1.2 Experimentos en movimiento

Los experimentos expuestos con anterioridad se han llevado a cabo con el receptor GPS fijo en una posición determinada. Sin embargo, es preciso estudiar cómo puede afectar a la fiabilidad de las medidas de posición el que el receptor se encuentre en movimiento. Con este fin, se ha realizado un experimento que consiste en colocar el GPS GN-74 en un coche que se movía a una velocidad media de 20 km/h dando 3 vueltas alrededor de una plaza rectangular durante 30 minutos, tomando los datos a una frecuencia de 0.5 Hz, índice dinámico 1 e índice de suavizado 3. El posicionamiento se ha realizado en el plano, esto es, umbral PDOP igual a 0, y el umbral de ángulo de elevación de los satélites queda fijado a su valor por defecto, 5° .

La figura B.16 muestra el resultado obtenido. En ella se observa que el recorrido registrado sufre un desplazamiento considerable con el tiempo. Así, aunque el coche alcanza tras recorrer tres veces el perímetro de la plaza la misma posición de partida, los datos representados en la figura B.16 muestran una clara desviación en el cálculo de estos puntos por parte del receptor GPS (puntos *Inicio* y *Final* en figura B.16). Sin embargo, a pesar de estas desviaciones, se reproduce de manera apreciable el perímetro rectangular de la plaza, conservándose la dirección del vehículo en su avance. Es decir, la variación entre dos medidas consecutivas es continua. Esto es debido a la presencia de filtros de suavizado intrínsecos a cada receptor GSP, que evitan que dos medidas consecutivas sean puntos aleatorios dentro de la región de incertidumbre de

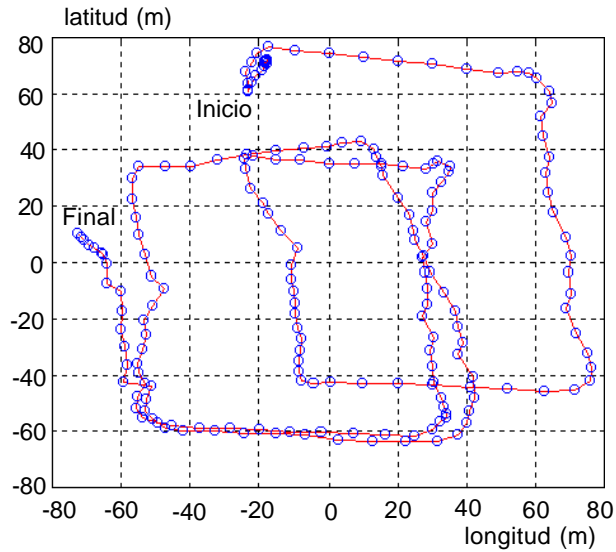


Figura B.16: Reproducción de un camino rectangular con un único receptor GPS

± 50 m, en otras palabras, que en entre dos medidas consecutivas no se produzcan grandes *saltos* de distancia o de error.

B.2 Sistema GPS en modo absoluto en ausencia de la S/A

El cese de la S/A ha originado un aumento considerable en la precisión GPS en modo absoluto, permitiendo su empleo en muchas aplicaciones civiles en las que antes era inviable su utilización.

Para estudiar la repercusión del cese de la S/A en la precisión de la señal civil GPS en modo absoluto, se ha llevado a cabo el registro de posiciones durante 21 horas a la frecuencia de 1 Hz, obtenidas con receptores GPS de diferentes prestaciones situados fijos en una determinada posición. Los receptores GPS empleados son los modelos GPS G8 [Ashtech 98] y GPS ACEII [Trimble 98a], ambos de ocho canales, y el modelo GPS 3100LR12 [Fugro 00], de doce canales.

La figura B.17a y la figura B.17b muestran, respectivamente, las medidas en el plano y la evolución de la altitud con el tiempo obtenidas con el receptor GPS G8; la figura B.19a y la figura B.19b para el receptor GPS ACEII; y la figura B.18a y la figura B.18b para el receptor GPS 3100LR12. Las desviaciones típicas, el rms horizontal, el CEP del 50% y del 95% y el valor vertical del 95% quedan reflejados en la tabla B.8.

Si se compara los datos reflejados en la tabla B.7, correspondiente a medidas tomadas con los receptores GPS G8, ACEII y 3100LR12 fijos en una determinada posición y operando en modo absoluto en presencia de la S/A, y los mostrados en la tabla B.8, obtenidos en idénticas condiciones salvo que la S/A se encontraba ya desactivada, se observa una espectacular mejora en

	GPS G8	GPS ACEII	GPS 3100RL12
Desv. típ. latitud (m.)	3.42	3.38	3.52
Desv. típ. longitud (m.)	2.25	2.19	1.77
Desv. típ. altitud (m.)	4.95	5.32	4.38
rms horizontal	4.09	4.02	3.93
CEP 50%	2.9	2.77	3.7
CEP 95%	8.5	8.2	8
Vertical 95%	8.6	8.3	7.5

Tabla B.8: Medidas de precisión con diferentes receptores GPS en modo absoluto

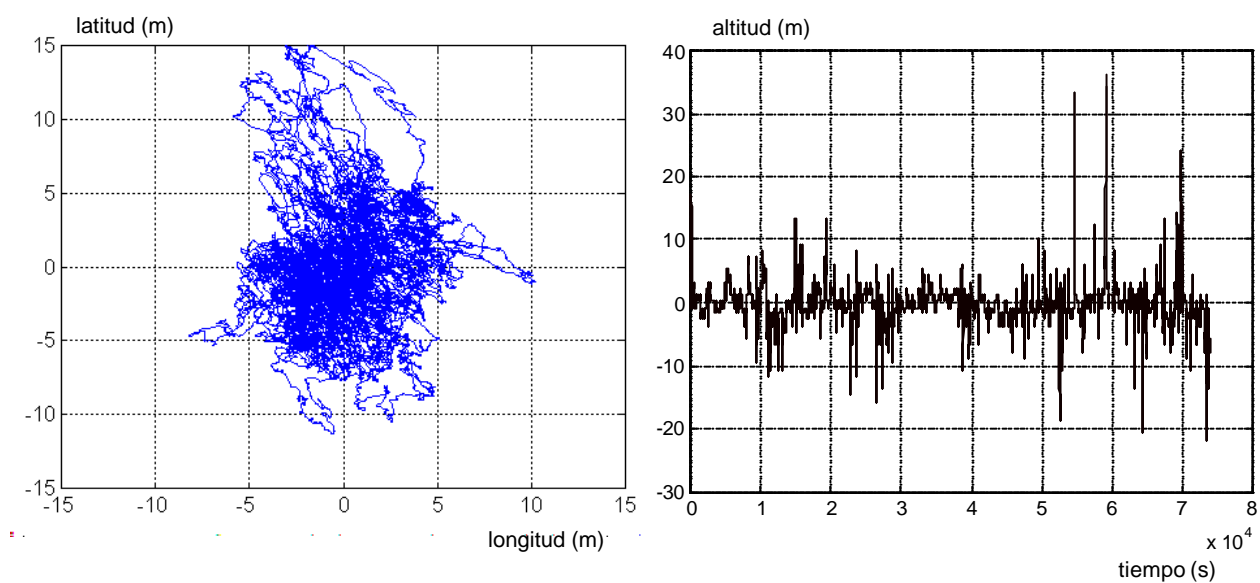


Figura B.17: Receptor GPS G8 en modo absoluto en ausencia de la S/A: a) Plano, b) Altitud

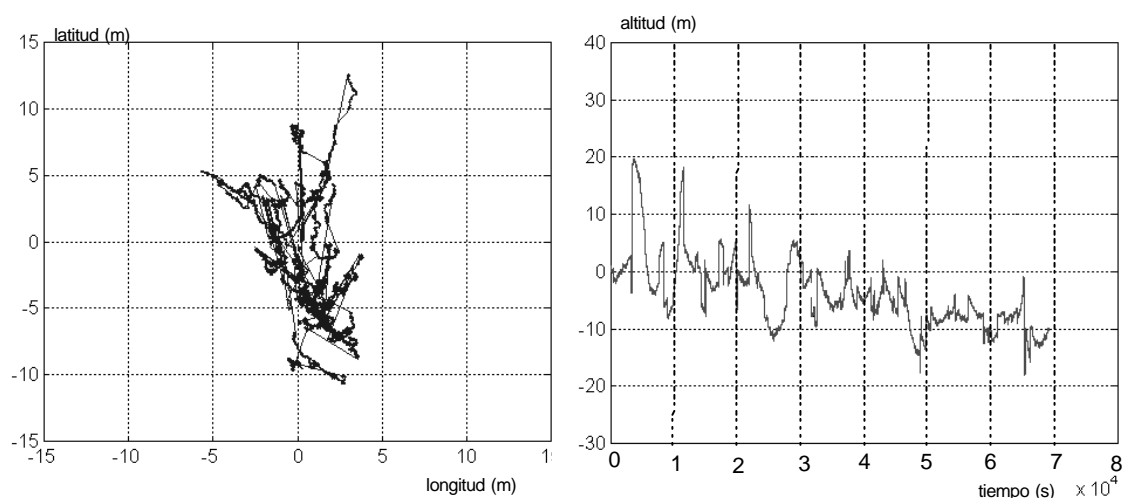


Figura B.18: Receptor GPS 3100LR12 en modo absoluto en ausencia de la S/A: a) Plano, b) Altitud

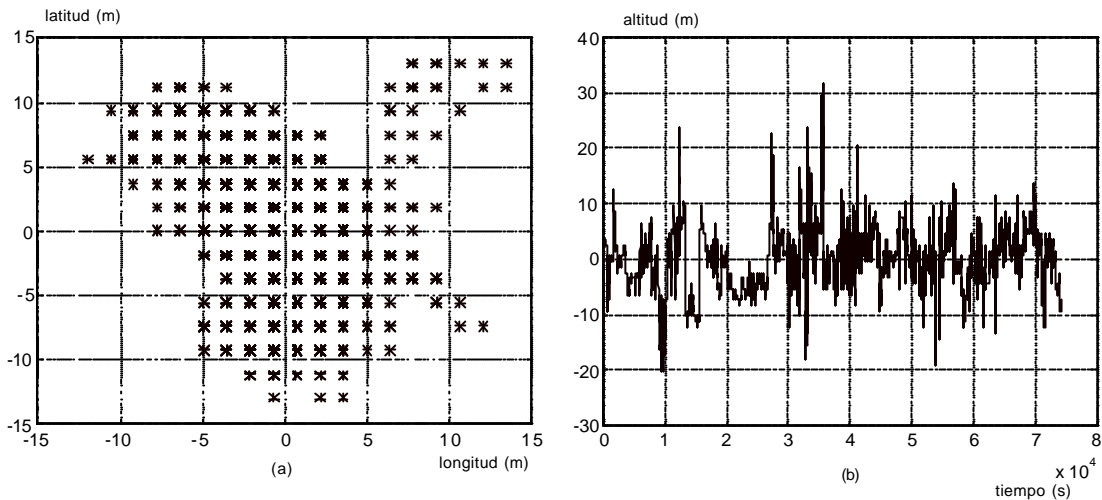


Figura B.19: Receptor GPS ACEII en modo absoluto en ausencia de la S/A: a) Plano, b) Altitud

	GPS G8	GPS ACEII	GPS 3100LR12
Desv. típ. latitud	85.51%	86%	89.3%
Desv. típ. longitud	91.22%	91.64%	86.27%
Desv. típ. altitud	78.16%	76.96%	87.18%
rms horizontal	87.75%	88.15%	88.87%
CEP 50%	88.16%	88.96%	85.54%
CEP 95%	84.08%	83.66%	84.52%
Vertical 95%	75.35%	79.42%	82.01%

Tabla B.9: Incremento de la precisión tras el cese de la S/A

la precisión. Así, por ejemplo, para el receptor GPS ACEII, la mejora en las medidas de latitud, longitud y altitud tras el cese de la S/A son, respectivamente, del 86%, 91.64% y 76.98%. Para el resto de los receptores, las mejoras son similares, tal y como se muestra en la tabla B.9. Puede observarse como la coordenada altitud está sensiblemente menos afectada que las coordenadas de latitud y longitud una vez desactivada la S/A.

Como se ha comprobado en los sucesivos experimentos, los errores que se producen en modo absoluto tras el cese de la S/A se sitúan en el margen de ± 15 m. Con este aumento de la precisión, la comunidad civil se ha visto enormemente favorecida, permitiendo el empleo del GPS sin técnicas diferenciales en muchas aplicaciones en las que antes resultaba inviable. A modo de ejemplo cabe citar, entre otros, los navegadores incorporados en coches de la gama alta, donde un error en el posicionamiento de 15 m es compensado con el empleo de técnicas de emparejamiento con mapas definidos de la ciudad; llamadas de alarmas o de socorro, o bien actividades recreativas como escaladas, bajadas de ríos, etc. Sin embargo, para otras actividades, como la navegación autónoma de vehículos en un entorno del que sólo conoce ciertas características relevantes y donde tiene que desarrollar una determinada actividad, se requiere el cálculo de la posición con una mayor precisión.

Apéndice C

Sistemas de coordenadas para posiciones GPS

Los datos geodésicos definen los sistemas de coordenadas empleados para describir el tamaño y la forma de la Tierra. Describen así el modelo empleado para corresponder las coordenadas de la posición de un objeto en la superficie terrestre a coordenadas en un mapa.

Son muchos los sistemas de referencia empleados para definir la posición de un determinado punto sobre la superficie terrestre. Estos sistemas van desde los que consideran la Tierra como una esfera perfecta a los más recientes, que emplean un modelo elipsoidal de la misma.

Los modelos esféricos representan la Tierra como una esfera de radio específico. Estos modelos suelen emplearse para distancias cortas o para obtener posiciones aproximadas. El modelo elipsoidal de la Tierra tiene en cuenta el achatamiento de ésta en los polos y se emplea para obtener una mayor precisión en los cálculos para grandes distancias. El sistema LORAN-C y GPS se basan en este último modelo.

Los sistemas de coordenadas esféricos emplean líneas curvas horizontales, llamadas paralelos, para la medida de la latitud (norte-sur) y líneas verticales, denominadas meridianos, para la medida de la longitud (este-oeste). La localización en tales sistemas se define en grados, minutos y segundos de latitud y longitud. Sin embargo, con objeto de simplificar el empleo de mapas y de evitar los inconvenientes de la localización en los sistemas curvilíneos, se definió un nuevo sistema de proyección para la localización basado en la superposición en el mapa de una rejilla rectangular formada por dos conjuntos de líneas rectas paralelas uniformemente espaciadas, siendo las de un conjunto perpendiculares a las del otro. Esta rejilla se define de tal forma que cualquier punto del mapa pueda ser designado por su longitud y latitud o por sus coordenadas en la rejilla, pudiéndose realizar un cambio de coordenadas para pasar de un sistema a otro. Un sistema de tales características de especial interés para los usuarios de GPS es el denominado

UTM (*UTM, Universal, Transverse Mercator*)¹, que expresan la posición de cualquier objeto en la superficie terrestre en metros este y norte respecto de dos líneas perpendiculares de referencia.

C.1 Sistema de coordenadas: longitud, latitud y altitud

El sistema de coordenadas más utilizado para determinar un punto sobre la superficie terrestre viene expresado en parámetros de longitud, latitud y altitud, que pueden ser definidas de diversas formas. Una de ellas es la denominada longitud, latitud y altitud geodésicas, que son las que configuran el sistema de coordenadas empleado por los receptores GPS para obtener posiciones: sistema WGS-84 (*WGS-84, World Geodetic System 1984*). Este sistema de coordenadas se basa en un modelo elipsoidal de la Tierra que emplea como planos de referencia el plano del Ecuador (0° latitud) y del Primer Meridiano o Meridiano de Greenwich (0° longitud).

Se denomina elipse de referencia a la resultante de la intersección entre el elipsoide terrestre y el plano definido por el eje de rotación de la Tierra (eje Z) y el punto P del cual se desea calcular su posición (figura C.1). Cada elipse de referencia viene definida con un radio ecuatorial (semieje mayor a) y un radio polar (semieje menor b). A partir de estos dos términos se definen otros como la excentricidad e , que hace referencia a la desviación entre los semiejes mayor y menor de la elipse, y *flattening*, que define la relación entre los semiejes mayor y menor de la elipse. Para el modelo WGS-84, los parámetros que definen la elipse de referencia poseen los siguientes valores:

$$a = 6378137\text{metros} \quad (\text{C.1})$$

$$b = 6356752.3142\text{metros} \quad (\text{C.2})$$

$$f = \frac{1}{298.257223563}\text{metros} \quad (\text{C.3})$$

$$e^2 = 0.00669437999013\text{metros} \quad (\text{C.4})$$

Se define longitud geodésica λ de un determinado punto al ángulo que forman el plano del Ecuador con la dirección vertical a una línea normal a la elipse de referencia y que pasa por el punto P (figura C.1).

La longitud geodésica ϕ de un punto P es el ángulo entre el plano de referencia de longitud cero y el plano que contiene a la elipse de referencia, ambos perpendiculares al plano del Ecuador (figura C.1).

¹Muchos modelos GPS ofrecen la posibilidad de expresar sus coordenadas de posición en el sistema UTM en lugar de en grados, minutos y décimas de minutos.

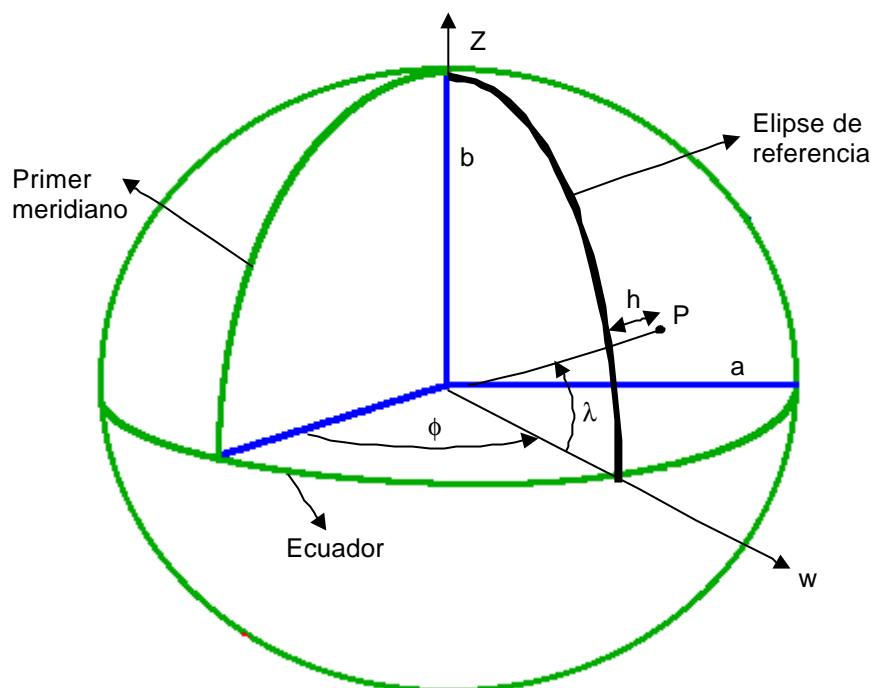


Figura C.1: Coordenadas longitud, latitud y altitud

Según la figura C.1, se define la altitud o altura geodésica h como la distancia desde la elipse de referencia al punto en cuestión, en dirección normal a la elipse de referencia.

C.2 Sistema de coordenadas UTM

El sistema de coordenadas UTM [Carnes 99] fue adoptado por la Armada de los Estados Unidos en 1947 para designar coordenadas rectangulares en mapas militares de gran escala. Actualmente, el sistema UTM es el empleado por las fuerzas armadas de los Estados Unidos y de la OTAN. La mayoría de los receptores GPS ofrecen la posibilidad de expresar posiciones en coordenadas UTM, por lo que este sistema de coordenadas, más simple que el que emplea la longitud y latitud, se ha extendido rápidamente.

El sistema UTM divide la Tierra en 60 zonas, cada una de ellas con un ancho de 6° de longitud. En longitud, cada zona UTM se extiende desde los 80° sur a los 84° norte (figura C.2). En las regiones polares ($80^\circ - 90^\circ$ sur y $84^\circ - 90^\circ$ norte) se emplea el sistema de coordenadas UPS (*UPS, Universal Polar Stereographic*).

Cada zona UTM viene identificada por un número, comenzando con la *zona 1*, entre las co-

ordenadas 180° y 174° longitud oeste consecutivamente hasta la *zona 60*, comprendida por las coordenadas 174° y 180° longitud este C.2.

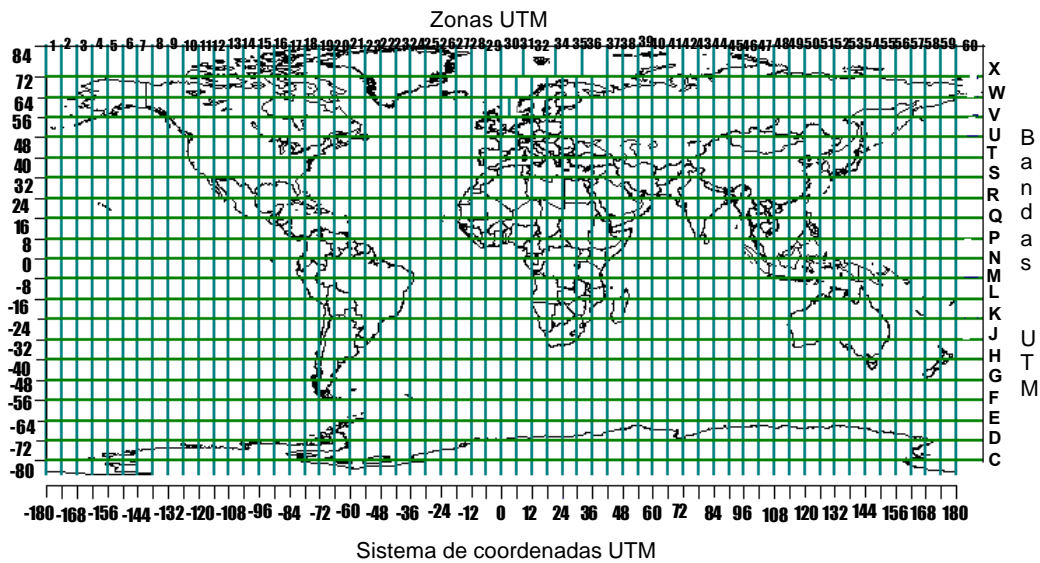


Figura C.2: Zonas UTM [Dana 95]

Las 60 zonas UTM están divididas horizontalmente en bandas horizontales con un ancho de 8° de latitud, excepto la situada más al sur, con un ancho de 12° de latitud. Cada una de estas bandas se denota con una letra, comenzando por la letra *C* (banda $80^\circ - 72^\circ$ latitud sur), hasta acabar con la letra *X* (banda $72^\circ - 84^\circ$) (figura C.2). Las letras *I* y *O* se omiten para evitar confusión con los números uno y cero.

En cada una de las zonas UTM se superpone una rejilla cuadrangular. Su alineación es tal que las líneas verticales son paralelas a una línea vertical que pasa por el centro de cada zona, y que se denomina *meridiano central* (figura C.3).

Las coordenadas UTM se expresan como una distancia en metros desde el este y una distancia en metros desde el norte. Cada coordenada UTM es específica para la zona en la que el objeto se sitúa. Así, pilotos y marineros que navegan sobre distancias mucho mayores a las que abarca una zona UTM, emplean el sistema de coordenadas latitud y longitud. Se indica a continuación cómo se definen las coordenadas UTM.

Las coordenadas UTM este están referenciadas respecto a una línea central que divide en partes iguales cada una de las zonas UTM, y que se denomina *meridiano central*. A este meridiano central se le asigna un valor de 500000mE (figura C.3). Así, posiciones al oeste del meridiano central posee un valor de la coordenada este UTM menor a 500000 metros, mientras que las posiciones al este del meridiano central se corresponden con un valor de la coordenadas este UTM superior a 500000 metros. No existe valores nulos o negativos de la coordenada este UTM, ya

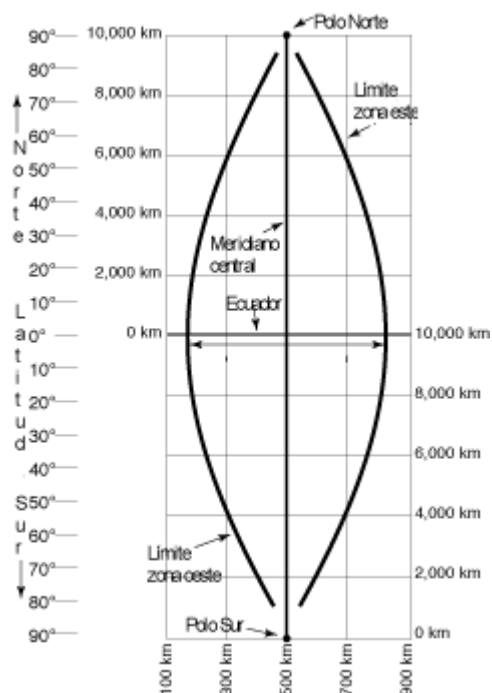


Figura C.3: Zonas UTM

que el ancho de cada zona (6° longitud) es igual a 674000 m^2

Los valores mínimo y máximo de las coordenadas este UTM son (figura C.3):

$$\text{Valores máximos : } 160000mE \text{ y } 834000mE \text{ en el Ecuador (} 0^\circ \text{ latitud)} \quad (\text{C.5})$$

$$\text{Valores mínimos : } 465000mE \text{ y } 515000mE \text{ en } 84^\circ N \text{ latitud} \quad (\text{C.6})$$

Las coordenadas norte UTM se miden respecto del Ecuador. Para localizaciones al norte del ecuador, a éste se le asigna la coordenada $0mN$. Para evitar coordenadas negativas, para las localizaciones al sur del Ecuador, se le asigna a éste el valor de $10000000mN$ (figura C.3). Al no existir coordenadas negativas, se necesita indicar de algún modo si la localización se encuentra al norte o al sur del Ecuador. Generalmente ésto se realiza añadiendo a la coordenada metros este y metros norte la letra de la banda de latitud en la que se encuentran (figura C.2).

Son varias las ventajas de emplear coordenadas UTM para la localización de objetos. Entre ellas, caben destacar las siguientes:

- Las coordenadas UTM proporcionan una relación de distancia constante en cualquier lugar del mapa. En coordenadas angulares como la longitud y latitud, la distancia cubierta por

² $674000/2 < 500000$.

un grado de longitud difiere conforme se avanza hacia los polos y sólo es igual a la distancia que abarca un grado de latitud en el Ecuador.

- No existen coordenadas negativas, ni es necesario utilizar el calificativo de *este/oeste* al definir la longitud.
- Al igual que el sistema cartesiano, los valores de las coordenadas se incrementan de arriba a abajo y de izquierda a derecha. No hace falta emplear relaciones trigonométricas para trabajar con tales coordenadas.
- Las coordenadas UTM se expresan en metros.

Apéndice D

Arquitectura cliente-servidor en el robot ROJO

Se describen en este apéndice las funciones implementadas en los programas servidor y cliente, así como la estructura del conjunto de mensajes que se han definido para el envío de órdenes e información entre ambos módulos.

D.1 Programa servidor

D.1.1 Ciclo de atención a los clientes

El funcionamiento del ciclo de atención a los clientes es el siguiente. El programa SERVER permanece constantemente a la escucha, de modo que, en el momento en que le llega una solicitud de conexión por parte de un cliente, puede atenderla. El número máximo de clientes que pueden conectarse simultáneamente al servidor viene limitado por la capacidad de la red. Aunque la capacidad de la misma es muy superior a las requeridas para esta aplicación, se ha limitado, vía software, el número de clientes a un máximo de veinte.

Son cuatro los tipos de mensaje que, aparte de la conexión/desconexión o comienzo y fin de la comunicación, el cliente envía al servidor: mensajes de suscripción y desuscripción a los datos sensoriales, activación del control de giro y mensajes especiales. Cada tipo de mensaje posee un código identificativo formado por dos dígitos:

- 00: Mensajes de suscripción a las diferentes señales sensoriales.
- 01: Mensajes de desuscripción a las distintas señales sensoriales.
- 12: Mensaje de activación de control del giro.

- 98: Mensajes especiales: puesta a cero de la odometría, marcha y parada del robot.

Cualquiera de los clientes conectados al servidor puede solicitar en cualquier momento la suscripción o desuscripción a las señales de los distintos sensores a bordo del robot. Sin embargo, sólo uno de los clientes puede ejercer el control del giro del tractor y tener acceso a los mensajes especiales. En caso de no ser así, cada cliente podría ordenar al tractor ROJO la ejecución de un giro o bien ordenar su parada o puesta en marcha, y estas órdenes pueden entrar en conflicto con las enviadas por otro de los clientes. El programa SERVER considera como *cliente controlador*, esto es, el cliente con capacidad para gobernar el movimiento del vehículo y la puesta a cero de la odometría, al que solicita por primera vez un mensaje de activación de control de giro o un mensaje especial. En el momento en que esto ocurre, se prohíbe el acceso al control y a los mensajes especiales al resto de los clientes, que ejercerán el papel de supervisores o monitorizadores de las señales sensoriales. Si el *cliente controlador* desea dejar de ejercer el control del robot o bien abandona la comunicación, SERVER elimina la prohibición ejercida al resto de los clientes conectados a la espera de un nuevo *cliente controlador*.

Se detallan a continuación los cuatro tipos de mensajes que el cliente puede solicitar al servidor: suscripción y desuscripción a las señales sensoriales, control del giro y mensajes especiales.

a) MENSAJES DE SUSCRIPCIÓN Y DESUSCRIPCIÓN A LAS SEÑALES SENSORIALES

Cada cliente puede solicitar al servidor que le sea enviada una o varias de las señales sensoriales disponibles: posición odométrica, información procedente del GPS, estado de las válvulas, ángulo de giro del volante, etc. Para ello, el cliente realiza lo que se denomina una *suscripción*, identificada con el código "00" (tabla D.1), a los datos que desea recibir. En cualquier momento, el cliente puede solicitar al servidor el cese del envío de datos sensoriales mediante un mensaje de *desuscripción* a esos datos. El mensaje de desuscripción viene identificado con el código "01" (tabla D.1).

Para indicar qué señal el cliente desea recibir o dejar de recibir, los mensajes de suscripción y desuscripción se completan añadiendo, tras el código, otros dos dígitos que identifican a cada una de las señales. En la tabla D.1 se muestra la codificación empleada y su significado.

Para la correcta gestión de las suscripciones y desuscripciones, el programa SERVER dispone de un *vector de suscripciones* para cada señal (tabla D.1). La longitud de cada *vector de suscripciones* es de veinte, por ser éste el máximo número de clientes permitidos por el programa. Un "1" en la componente k del *vector de suscripciones_l* indica que el cliente k solicita el envío de la señal l . Si en cualquier momento el cliente k desea dejar de recibir la señal l , se marcará con un "0" la componente k del *vector de suscripciones_l*. Al comienzo de la comunicación, cada

	Código	Tipo de señal	Vector	Significado
Mensajes de suscripción	00	02	v[20]	Suscripción a las válvulas
	00	03	o[20]	Suscripción a la odometría
	00	04	g[20]	Suscripción al GPS
	00	11	vt[20]	Suscripción a los voltajes
	00	12	cg[20]	Suscripción a los datos de giro
Mensajes de desuscripción	01	02	v[20]	Desuscripción a las válvulas
	01	03	o[20]	Desuscripción a la odometría
	01	04	g[20]	Desuscripción al GPS
	01	11	vt[20]	Desuscripción a los voltajes
	01	12	cg[20]	Desuscripción a los datos de giro y desactivación del control de giro

Tabla D.1: Comunicación cliente \Rightarrow servidor: Mensajes de suscripción y desuscripción

vector de suscripciones está inicializado a cero.

Dentro de los mensajes de desuscripción a las señales sensoriales, existe un mensaje de desuscripción especial: desactivación del controlador del giro. Mediante este mensaje, un cliente indica con un "0" en el vector $cg[k]$ el cese del envío del ángulo de giro del volante, y si se trata del *cliente controlador*, le permite además renunciar a ejercer el control del tractor. En ese momento, el programa SERVER desactiva la prohibición impuesta al resto de los clientes, que quedan libres para solicitar el control del tractor.

b) MENSAJES DE CONTROL DEL GIRO Y MENSAJES ESPECIALES

El mensaje de activación de control de giro y los mensajes especiales (puesta en marcha y parada del tractor y puesta a cero de la odometría) vienen identificados, respectivamente, con el código "12" y el código "98". Son mensajes exclusivos, en el sentido de que sólo uno de los clientes, el primero que solicite cualquiera de estos mensajes (*cliente controlador*), es el que puede ejercer el control sobre el giro del vehículo u ordenar su marcha, parada o puesta a cero de la odometría. El *cliente controlador* se identifica con un "1" en la posición k del vector $cg[k]$ ($k = 1$ si es el cliente 1 el que se conectó al servidor, $k = n$ si es el cliente n) (tabla D.1). Mientras que exista un *cliente controlador*, el programa SERVER prohíbe al resto de los clientes su acceso al control del tractor. La estructura de los mensajes de activación del control del giro y los mensajes especiales se muestra en la tabla D.2.

Si el *cliente controlador* ha solicitado el mensaje de activación del control del giro, SERVER lee el giro deseado del mensaje enviado por el cliente (tabla D.2) e inicializa el ciclo de control de giro del robot. Este ciclo es el que regula la apertura y cierre de las electroválvulas para que el pistón de dirección lleve al volante, y con ello a las ruedas delanteras, a alcanzar el giro deseado.

Son tres los mensajes especiales que el *cliente controlador* puede ordenar al tractor: puesta a

	Código	Tipo de señal	Significado
Mensaje de activación de control del giro	12	Ángulo de giro	Activa el controlador del giro para orientar el volante con el ángulo especificado
Mensajes especiales	98	00	Puesta a cero de la odometría
	98	01	Puesta en marcha del vehículo
	98	02	Parada del vehículo

Tabla D.2: Comunicación cliente \Rightarrow servidor: Mensajes de activación del control del giro y mensajes especiales

cero de la odometría, puesta en marcha del vehículo y parada del mismo (tabla D.2).

El primero de ellos consiste en asignar el valor cero a la distancia y orientación obtenidas por odometría¹.

Los mensajes de puesta en marcha del vehículo y parada son mensajes complementarios y excluyentes, es decir, la activación de uno de estos mensajes desactiva la llamada al otro. Su funcionamiento es el siguiente. Si SERVER recibe por parte del *cliente controlador* el mensaje de parada del vehículo, ordena a las electroválvulas que gobiernan el pedal del embrague/freno del tractor a que lleven al pistón hasta el máximo de su recorrido, detectado por el potenciómetro. Si lo que se desea es la puesta en marcha del tractor, la orden a las electroválvulas será la de llevar al pistón al extremo mínimo de su recorrido.

Una vez que el primer cliente se ha conectado correctamente al servidor, se inicia un ciclo continuo de lectura de las señales sensoriales, procesado de la información y envío a los clientes. Este proceso se ha implementado mediante una hebra para la lectura del GPS a través del puerto serie del PC a bordo del tractor y de un temporizador para la lectura de los voltajes a través de la tarjeta de adquisición de datos de los restantes sensores, extracción de la información útil y envío a los clientes que así lo hayan solicitado.

D.1.2 Ciclo de lectura de la señal GPS

La señal GPS se recibe a través del puerto serie, configurado según las especificaciones del GPS empleado a una velocidad de 9600 baudios, 8 bits de datos, un bit de control y paridad nula. De entre los mensajes NMEA que puede transmitir el receptor, se ha empleado un mensaje NMEA propiedad del fabricante (mensaje *POS*, apéndice A), por contener toda la información necesaria para la tarea del posicionamiento del tractor. Este mensaje *POS* se recibe a una frecuencia de 0.2 Hz, esto es, 5 veces por segundo. Este ciclo de control se encuentra contenido

¹Recuérdese que la odometría es un sensor relativo y, como tal, determina la posición del vehículo a partir de la estimada en un instante anterior. Esto es, la distancia en el instante t se calcula al añadir el incremento de distancia recorrido en cada intervalo de tiempo a la distancia en coordenadas globales calculada en el instante $t-1$.

	Tipo de señal	Campos	Significado
Mensajes de envío de datos sensoriales	02	Posición pistón dirección \t Posición pistón pedal	Datos de las válvulas
	03	CoordenadaX \t CoordenadaY \t Orientación \t Distancia	Datos de la odometría
	04	Longitud \t Latitud \t Altura \t No.Sat. \t Modo \t Orientación	Datos GPS
	11	volt[0] \t volt[1] \t volt[2] \t volt[3] \t volt[4] \t volt[5]	Datos de voltajes
	12	Ángulo giro volante \t Error giro \t Error anterior	Datos del giro del volante

Tabla D.3: Comunicación servidor \Rightarrow cliente: Mensajes de envío de datos sensoriales

en una hebra, que se ejecuta cada vez que un carácter llega al puerto serie. Los caracteres recibidos se almacenan en un *buffer*, desde el carácter de comienzo de trama "\$" hasta el fin de trama $\backslash n$.

Una vez leída la trama *POS* del puerto serie se procede a su procesado, esto es, se extrae del mensaje recibido las coordenadas de posición en longitud, latitud y altitud, el número de satélites empleado para posicionar, si el modo de posicionamiento es absoluto o diferencial y la orientación de la trayectoria del robot respecto al norte. Esta información será enviada a aquellos clientes que así lo hayan solicitado (tabla D.3). La estructura de la trama *POS* se muestra en el apéndice A.

D.1.3 Ciclo de lectura de la tarjeta de adquisición de datos, procesado de la información y envío a los clientes

La lectura de las señales analógicas correspondientes a los sensores a bordo del tractor se ha realizado en un ciclo de control que se activa cada 10 ms (figura 4.15). En él se efectúa la lectura de todos los canales analógicos de la tarjeta de adquisición de datos, almacenando los voltajes leídos en un *vector de voltajes* (vector *volt*). Este vector de voltajes *volt[4]* posee cuatro campos (tabla D.3): *volt[0]* y *volt[1]* se corresponden con la posición del pistón del pedal del embrague y del pistón de dirección y *volt[2]* y *volt[3]* almacenan, respectivamente, los voltajes correspondientes a la salida del sensor de efecto hall izquierdo y derecho que sirven de odómetros. Estas últimas señales requieren de un procesado para extraer la información sensorial relevante.

a) DATOS DE LAS VÁLVULAS

Los voltajes almacenados en las posiciones *volt[0]* y *volt[1]* se corresponden con la salida de los potenciómetros que miden la posición de los pistones del sistema de actuación del tractor: el que

gobierna la dirección del vehículo y el que acciona el pedal del embrague/freno. A partir de esta información, se obtiene el ángulo de giro del volante y la posición del pedal del embrague/freno.

La ecuación que permite obtener el ángulo de giro del volante en función del voltaje de salida del potenciómetro de dirección $volt[0]$ y la que permite conocer la posición del pistón del embrague, a partir del voltaje de salida del potenciómetro del pedal del embrague $volt[1]$, se han obtenido de forma experimental tras una amplia colección de ensayos. Así, el ángulo de giro del volante viene dado por la expresión (4.2): $\alpha = 102.6 \text{ volt}[0] - 93.3$. La posición del pedal del embrague/freno se obtiene por la expresión: $0.76 \text{ volt}[1] - 0.13$.

b) DATOS DE LA ODOMETRÍA

La odometría se basa en el cómputo de la distancia y el cambio de orientación del móvil a partir del número de vueltas dadas por cada una de las ruedas del vehículo. En esta aplicación, se han empleado como odómetros dos sensores de efecto hall que detectan la variación del campo magnético creado por 32 imanes situados radialmente en la cara interna de cada una de las ruedas del tractor (apartado 4.3.1).

Los voltajes almacenados en las posiciones $volt[2]$ y $volt[3]$ se corresponden, respectivamente, con la lectura del sensor de efecto hall izquierdo y derecho. Cada vez que se detecta un imán, se produce un incremento en la tensión de salida del sensor (figura 4.11). Estos pulsos de tensión se contabilizan empleando un contador para cada uno de los sensores: N_I y N_D . Multiplicando el valor de estos contadores, esto es, el número de imanes detectados, por la distancia de separación entre imanes, que es igual al perímetro de cada rueda trasera dividido entre 32, se obtiene la distancia recorrida por la rueda izquierda $\Delta s_I(t)$ y derecha $\Delta s_D(t)$ en cada instante de tiempo, ecuación (4.3). Una vez conocida la distancia recorrida por cada una de las ruedas, se puede deducir la distancia total recorrida por el vehículo, el cambio de orientación y, con ello, las coordenadas $(x(t), y(t), \phi(t))$ de la posición del vehículo en cada instante de tiempo [Borenstein 94]. En el apartado 4.5.3 se ha detallado la forma de obtención de estas ecuaciones.

Cada vez que se realiza una operación de lectura o de escritura en la tarjeta de adquisición de datos, se examina el código de error propio de los *drivers* de la tarjeta, comprobando que la operación ha sido realizada correctamente. En caso de detectarse algún fallo, se genera un mensaje de error. Los errores que puedan producirse en la comunicación son tratados por las rutinas de los WinSockets, y tanto el cliente como el servidor reciben notificación de los mismos.

Para terminar el ciclo de control, se procede al envío de los datos sensoriales a los clientes que así lo hayan solicitado. Para ello, se consultan para cada cliente los vectores de suscripciones a las distintas señales. Si el cliente k tiene un "1" en el *vector de suscripciones_l* de la señal l , el servidor envía a ese cliente el mensaje correspondiente a la información sensorial requerida. La

estructura de estos mensajes de envío de datos se muestra en la tabla D.3. Al ser los mensajes mostrados en la tabla D.3 la respuesta del servidor a la solicitud de suscripción enviada por el cliente, cada mensaje comienza con los dos dígitos identificativos del tipo de señal deseada. A estos dígitos le siguen los datos sensoriales, separados por un carácter especial ($\backslash t$) para facilitar su lectura e interpretación por parte del cliente.

Con el mismo objetivo de proporcionar una lectura sencilla, todos los mensajes que el servidor envía al cliente (tabla D.3) y que el cliente envía al servidor (tablas D.1 y D.2) acaban con el *fin de mensaje* " $\backslash r \backslash n$ ", esto es, fin de línea y retorno de carro.

D.1.4 Ciclo de control del giro del robot

El control del movimiento del pistón que gobierna la dirección del vehículo, se lleva a cabo mediante la entrada de cierta cantidad de aire en cada una de las cámaras del cilindro que lo contiene. El control de las electroválvulas, que son las que permiten la entrada del aire, se realiza mediante modulación de ancho de pulso (PWM). Para ello, se envía a la electroválvula pulsos de amplitud fija durante períodos de tiempo T_{b_i} , variables (figura 4.5). A nivel software, estos pulsos se han implementado mediante dos temporizadores enlazados.

La dificultad del control del giro reside en conocer qué ancho de pulso debe aplicarse en cada ciclo de control para obtener el ángulo de giro deseado, debido a la alta no linealidad del sistema válvula-cilindro neumático-eje de dirección, así como a la existencia de muchas variables ocultas, tales como diferente diámetro en el orificio de las válvulas o variación en la presión del calderín. La dificultad de encontrar un modelo analítico del sistema ha llevado a la utilización de un controlador derivativo proporcional borroso para tal aplicación. Este controlador borroso cuenta con dos variables de entrada, error en el ciclo actual $e(t)$ y error en el ciclo anterior $e(t-1)$, y una variable de salida, pulso para la apertura de las electroválvulas (figura 4.8) [García-Pérez 00]. Las diferentes reglas del controlador borroso se encuentran almacenadas en un fichero de texto denominado *Base de Reglas*.

La conexión del primer cliente origina la apertura del fichero *Base de Reglas* y la instanciación de variables, esto es, la asignación de las variables específicas de la aplicación a las variables genéricas del controlador. El ciclo de control del giro se activa cuando el *cliente controlador* solicita por primera vez el control del giro del tractor (tabla D.2). Dentro de este ciclo de control, se calculan los valores de las variables de entrada, esto es, el error actual $e(t)$ y el error anterior $e(t-1)$, se obtiene el valor de la variable de salida, ancho del pulso (variable DC), y se envía a la electroválvula un pulso con la duración calculada mediante su escritura en la tarjeta de adquisición de datos.

Error	Vetor de estado	Significado
Nulo	[0, 0]	No se ordena giro: válvulas cerradas
Negativo	[1, 0]	Giro a la izquierda: apertura válvula izquierda
Positivo	[0, 1]	Giro a la derecha: apertura válvula derecha

Tabla D.4: Valores del vector de *estado* y significado

Se analiza a continuación cómo se obtiene, vía software, el cálculo de la duración de cada pulso. Para ello, se emplean dos temporizadores enlazados. El primero de ellos tiene un tiempo de activación constante, que tras múltiples pruebas del controlador se ha fijado en $T_a = 250$ ms; este valor se corresponde con el periodo de la señal PWM. El segundo *Timer*, T_b , tiene duración variable, e indica el tiempo de duración del pulso (tiempo T_{b_i} en la figura 4.5), esto es, el tiempo que la electroválvula correspondiente está abierta para permitir el paso del aire. Nótese que, a lo sumo, sólo se produce un pulso en cada periodo de control.

En el temporizador T_a se realizan las siguientes instrucciones:

1. Actualizar los valores de las variables de entrada del controlador: $e(t)$ y $e(t - 1)$.
2. Obtener del controlador borroso (fichero *Base de Reglas*) el valor de PWM correspondiente a estos valores de las entradas. Este valor viene expresado en tanto por ciento.
3. Calcular el vector *estado* que guía la actuación de la electroválvula que regula la salida de aire a la cámara izquierda del pistón de dirección y de la electroválvula que regula la salida de aire a la cámara izquierda del mismo, dependiendo del sentido de movimiento requerido. Los valores que puede tomar el vector *estado* depende del *error*, esto es, de la diferencia entre el valor del giro deseado, indicado por el cliente (*cliente controlador*) en el mensaje de giro del volante (tabla D.3), y la posición actual del pistón de dirección, obtenida por la lectura del canal de la tarjeta de adquisición de datos correspondiente a la salida del potenciómetro. Las tres situaciones posibles que pueden darse son las reflejadas en la tabla D.4:
4. Escribir en el *buffer* de la tarjeta el valor del vector de *estado* para ordenar la apertura de la válvula correspondiente.
5. Activar el temporizador T_b con un tiempo igual al de la apertura de la válvula indicada en el vector *estado*: $T_b = T_a PWM / 100$.

El temporizador T_b pone el vector *estado* al valor $estado = [0, 0]$, provocando así el cierre de las dos válvulas, esto es, el flanco de bajada del pulso.

Como el temporizador T_a se activa cada 250 ms, el ciclo se repite de modo infinito².

D.2 Programa cliente

D.2.1 Establecimiento de la conexión

Para iniciar la conexión, el programa CLIENTE debe abrir un *socket cliente* que solicite la conexión con el nodo TRACTOR, que es dónde se ejecuta el programa SERVER. Para ello, en el menú *File* del programa CLIENTE se ofrece la opción de *Connect to...*, apareciendo un cuadro de diálogo en el que hay que introducir el nombre del nodo servidor: *tractor.iaimovil.csic.es* (figura 4.18).

Si la conexión entre ambos nodos se ha producido con éxito, el programa CLIENTE recibe un mensaje de *OK*, indicando así que SERVER está dispuesto tanto a recibir cualquier solicitud por parte del cliente como a enviar a dicho cliente la respuesta a sus peticiones.

D.2.2 Suscripción y desuscripción a las señales sensoriales e interpretación de los mensajes enviados por el servidor

Son varios los mensajes que el cliente puede enviar al servidor: mensajes de suscripción y desuscripción a las señales sensoriales, mensajes de control del giro y mensajes especiales. Estos dos últimos son de carácter exclusivo, y sólo pueden ser enviados por el denominado *cliente controlador*.

En lo referente a los mensajes de suscripción y desuscripción, cualquier cliente, en cualquier momento, puede solicitar al servidor el envío de los datos de uno o varios de los sensores a bordo del robot, o bien solicitar el cese del envío de tales mensajes. Estas solicitudes las realiza internamente el cliente mediante los mensajes de suscripción y desuscripción, cuya estructura y significado se muestra en la tabla D.1. Un cliente diseñado para una tarea determinada solicitará del servidor únicamente la información que requiera para la realización de la misma.

El entorno gráfico del programa CLIENTE facilita al usuario el manejo de mensajes de suscripción y desuscripción. Así, si se desea la suscripción a la señal proporcionada por la odometría o por el GPS, basta con pulsar el botón etiquetado como *Susc* correspondiente a la señal deseada (figura 4.18). Una cruz en la casilla situada junto a la etiqueta de cada sensor indica las señales a las que el cliente se encuentra suscrito. La desuscripción a la información proporcionada por un determinado sensor se efectúa automáticamente al pulsar el botón *Desc* de la señal

²Nótese que si el servidor no recibe órdenes de control de giro por parte del *cliente controlador*, los pulsos T_{b_i} tendrán duración cero.

correspondiente (figura 4.18).

Cuando el programa CLIENTE envía un mensaje de suscripción al servidor, comienza a recibir con una periodicidad de 10 ms los mensajes que contienen los datos. La estructura de estos mensajes se recoge en la tabla D.3.

Cada vez que el cliente recibe un mensaje, analiza los dos dígitos identificativos para determinar a qué sensor corresponden los datos enviados:

- 02: Datos de las válvulas.
- 03: Datos de la odometría.
- 04: Datos del GPS.
- 11: Datos de los voltajes.
- 12: Ángulo de giro del volante.

Una vez identificado el tipo de señal, el cliente procede a la extracción de los datos almacenados en los diferentes campos del mensaje (tabla D.3). Al ir cada campo separado por el carácter `\t`, el análisis resulta sencillo.

Este proceso de envío de los mensajes sensoriales por parte del servidor, recepción dichos mensajes por el cliente y procesado de la información continúa hasta que el cliente solicite la anulación del envío de los datos a los que se encuentra suscrito.

Grabación en ficheros de texto de los datos sensoriales

El cliente, en cualquier momento, puede almacenar los datos sensoriales recibidos del servidor en un fichero de texto para su posterior representación o análisis. Para ello, el programa CLIENTE dispone de un botón por cada señal sensorial: odometría y GPS (figura 4.18). Al pulsar uno de estos botones, se abre un cuadro de diálogo solicitando el nombre del fichero en el que se van a grabar los datos sensoriales correspondientes. Para dejar de grabar una señal sensorial determinada, basta pulsar de nuevo el botón de grabación de dicha señal.

Pantalla de visualización de la trayectoria

En el panel de control del programa CLIENTE se ha incluido una pantalla para la visualización de la trayectoria seguida por el robot. Así, para visualizar la trayectoria, basta presionar sobre el botón *Dibuja* del panel de control (figura 4.18).

Los datos de posición del tractor para la representación de la trayectoria seguida se obtiene al fusionar la información recibida de los sensores a bordo del vehículo a cuyas señales el cliente se encuentra suscrito.

La tarea de visualización incluye varias opciones:

- Cambio de escala. El usuario puede cambiar la escala de la pantalla de visualización hasta un factor de 10. Esta opción resulta de gran utilidad para visualizar la trayectoria completa en recorridos largos.
- Centrado automático. Permite situar el centro de la pantalla de visualización a la posición actual del robot.
- Centrado manual. Mediante esta opción, el usuario puede variar las coordenadas x e y del centro de la pantalla.

Bibliografía

- [Abbott 98] E. Abbott, D. Powell, "Land-vehicle navigation using GPS", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 145-162, 1999.
- [Agostini 95] Y. Agostini, G. Bourhis, "Human-oriented architecture for an intelligent powered wheelchair", *Proc. of the IFAC Conference on Human-Oriented Design of Advanced Robotics Systems*, pp. 127-132, 1995.
- [Amidi 90] O. Amidi, *Integrated mobile robot control*, Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, EEUU, 1990.
- [Anderson 79] B. D. O. Anderson, J. B. Moore, *Optimal filtering*, Prentice Hall, New York, EEUU, 1979.
- [Aono 98] T. Aono, K. Fujui, S. Hatsumoto, T. Kamiya, "Positioning of vehicle on undulating ground using GPS and dead reckoning", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3443-3448, Leuven, Bélgica, 1998.
- [Arkin 87] R. C. Arkin, "Motor Schema Based Navigation for a Mobile Robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 264-271, 1987.
- [Arkin 98] R. C. Arkin, "Behaviour-based robotics", Technical Report MIT-TR-98-1, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, EEUU, 1998.
- [Arkin 89] R. C. Arkin, "Motor Schema Based Mobile Robot Navigation", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 99-112, 1989.
- [Arrebola 98] F. Arrebola, *Sistema de visión basado en imágenes multirresolución de fovea desplazable*, Tesis Doctoral, Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga, Málaga, 1998.
- [Ashtech 96a] Ashtech, "GPS G12 Board: Interface guide and operating manual", California, EEUU, 1996.

- [Ashtech 96b] Ashtech; "Z12 Real Time Sensor: Operation and reference manual", California, EEUU, 1996.
- [Ashtech 98] Ashtech, "GPS G8 OEM Board: Reference Manual", California, EEUU, 1998.
- [Barrientos 97] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer, R. Aracil, *Fundamentos de robótica*, McGraw Hill, 1997.
- [Barsky 87] B. Barsky, *Computer graphics and geometric modelling using Beta splines*, Springer-Verlag, Nuw York, EEUU, 1987.
- [Bauer 95] F. H. Bauer, E. G. Lightsey, J. McCullough, J. O'Donell, R. Schnurr, "GADACS: A GPS attitude determination and control experiment on a spartan spacecraft", *Control Engineering Practice*, Vol. 3, pp. 1125-1130, 1995.
- [Bejczy 91] A. Bejczy, "Recent developments in advance teleoperation at JPL", *Proc. of the 5th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 217-218, Pisa, Italy, 1991.
- [Beom 95] H. R. Beom, H. S. Cho, "A sensor-based navigation for a mobile robot using fuzzy logic and reinforcement learning", *IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 25, pp. 464-477, 1995.
- [Betke 97] M. Betke, L. Gurvits, "Mobile robot localization using landmarks", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 2, pp. 251-263, 1997.
- [Bonnifait 98] P. Bonnifait, G. Garcia, "Design and experimental validation of an odometric and gionometric localization system for outdoor robot vehicles", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 4, pp. 541-548, 1998.
- [Borenstein 94] J. Borenstein, L. Feng, *UMBark: A method for measuring, comparing and correcting dead-reckoning errors in mobile robots*, Technical Report, University of Michigan, EEUU, 1994.
- [Borenstein 96] J. Borenstein, L. Feng, "Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 6, pp. 869-880, 1996.
- [Borenstein 97] J. Borenstein, I. Ulrich, "The GuideCane: A computerized travel aid for the active guidance of blind pedestrians", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1283-1288, Alburquerque, New Mexico, 1997.
- [Bourhis 96] G. Bourhis, P. Pino, "Mobile robotic and mobility assistance for people with motor impairments: rational justification for the VAHM Project", *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 7-12, 1996.

- [Bouvet 99] D. Bouvet, G. García, "Performance evaluation of proprioceptive sensors for compactor localisation", *Proc. of the IAAA/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 73-78, Madrid, 1999.
- [Braasch 99] M. S. Braasch, J. Van Dierendonck, "GPS receiver architectures and measurements", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 48-64, 1999.
- [Brivot 96] R. Brivot, J. A. Marchant, "Segmentation of plants and weeds using infrared images", *Proc. of the Institute of Electrical Engineers, Vision, Image and Signal Processing*, Vol. 143, No. 2, pp. 118-124, 1996.
- [Brooks 85] R. A. Brooks, "Visual map making for a mobile robot", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 824-829, St. Louise, Missouri, EEUU, 1985.
- [Brooks 86a] R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-23, 1986.
- [Brooks 86b] R. A. Brooks, "A Layered Intelligent Control System for a Mobile Robot", *Proc. of the 3th International Symposium on Robotics Research*, pp. 365-372, Cambridge, Massachusetts, USA, 1986.
- [Brooks 90] R. A. Brooks, "A robot that walks: Emergent behaviours from a carefully involved network" en P. H. Winston & S. A. Shellard (Eds.), *Artificial Intelligence at MIT Expanding Frontiers*, pp. 28-39, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, EEUU, 1990.
- [Brooks 91] R. A. Brooks, "Artificial Life and Real Robots", *Proc. of the 1st European Conference on Artificial Life*, pp. 3-10, 1991.
- [Camacho 98] P. Camacho, F. Arrebola, F. Sandoval, "Adaptative multifoveal sensors for mobiles tracking", *Proc. of the 5th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS'98)*, pp. 449-452, Lisboa, Portugal, Vol. 2, 1998.
- [Cañas 99] J. M. Cañas, M. C. García-Alegre, "Modulated agents for autonomous robot piloting", *Proc. of the 8th Conference Spanish Artificial Intelligence (CAEPIA99)*, pp. 98-106, Murcia, 1999.
- [Caracciolo 99] L. Caracciolo, A. De Luca, S. Iannitti, "Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2632-2638, Detroit, Michigan, EEUU, 1999.
- [Carnes 99] J. Carnes, *UTM: Using your GPS with the Universal Transverse Mercator map coordinate system*, John Carnes, 1999.

- [Ceres 00] R. Ceres, J. M. Martín, L. Calderón, J. L. Pons, A. R. Jiménez, D. Domínguez, L. Acevedo, C. Basil, D. Lupoi, M. Nunes, V. González, L. Cernuzzi, J. R. Oliveira, M. Guanini, N. Salazar, A. Aguilar, "Vehículo personalizable para movilidad lúdica de niños con discapacidades neuromotoras graves", *Actas del 1er Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo para la Discapacidad (IBERDISCAP 2000)*, pp. 163-168, Madrid, 2000.
- [Chatila 85] R. Chatila, L. P. Laumond, "Position referencing and consistent world modelling for mobile robots", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 824-829, St. Louis, Missouri, EEUU, 1985.
- [Chui 90] C. K. Chui, G. Chen, *Kalman filtering with real-time applications*, Springer-Verlag, 2º Edición, 1990.
- [CMU 92] CMU, "Performance of a six-legged planetary rover: power, positioning and autonomous walking", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 120-125, Niza, Francia, 1992.
- [Connel 90] J. H. Connel, P. Viola, "Cooperative control of a semi-autonomous mobile robot", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1118-1121, Cincinnati, EEUU, 1990.
- [Connel 90b] J. H. Connel, *Minimalist mobile robotics. A colony-style architecture for an artificial creature*. Academic Press, Boston, 1990.
- [Codina 00] R. Codina, M. González, O. Frías, J. Sempere, "Modelización de los errores en las estaciones de referencia del sistema EGNOS", *Actas de la 4º Semana de Geomática, Cartografía y Navegación*, pp. 15-25, Sitges, Barcelona, 2000.
- [Cordesses 99] L. Cordesses, P. Martinet, B. Thuilot, M. Berducat, "GPS-Based control of a land vehicle", *Proc. of the XVI International Conference on Automation and Robotics in Construction*, pp. 41-46, Madrid, 1999.
- [Cox 90] I. J. Cox, "Blanche: Position estimation for an autonomous robot vehicle" en I. J. Cox & G. T. Wilfong (Eds.), *Autonomous Robot Vehicle*, pp. 221-228, Springer-Verlag, 1990.
- [Crane 95] C. D. Crane III, A. L. Rankin, D. G. Armstrong II, S. Wit, D. K. Novik, "An evaluation of INS and GPS for autonomous navigation", *Proc. of the 2nd IFAC Conference on Intelligent Autonomous Vehicles 95*, pp. 208-213, Helsinki, Finlandia, 1995.
- [Cristi 90] R. Cristi, F. A. Papoulis, A. J. Healey, "Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 152-160, 1990.

- [Crowley 89] J. L. Crowley, "Asynchronous control of orientation and displacement in a robot vehicle", *Proc.: IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1277-1282, 1989.
- [Cunha 95] J. P. Cunha, "Design of a high performance variable structure position control of ROV's", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 42-55, 1995.
- [Dana 95] P. H. Dana, *An overview of the global positioning system (GPS)*, [Online] W.W.W.: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gpd/gps-f.html>, Dpt. of Geography, University of Texas, USA, 2000.
- [Dellaert 98] F. Dellaert, D. Pomerleau, C. Thorpe, "Model-based car tracking with a road-follower", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1889-1894, Leuven, Bélgica, 1998.
- [DeBietto 94] P. A. DeBietto, "Fuzzy logic for depth control of unmanned undersea vehicles", *Proc. of the Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 233-241, 1994.
- [Dixon 97] J. Dixon, *An overview of global mobile robot navigation: Global positioning*, [Online], W.W.W.: <http://www-dse.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise97/journal/vol1/jmd>, 1997
- [Dorigo 96] M. Dorigo, "Introduction to the special issue on learning autonomous robots", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics*, Vol. 26, No. 3, pp. 361-364, 1996.
- [Dougherty 90] F. Dougherty, "At-sea testing of an unmanned underwater vehicle flight control system", *Proc. of the Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 65-73, 1990.
- [Du 95] Y. F. Du, "ALX: Autonomous vehicle guidance for roadway following and obstacle avoidance", em *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 1, pp. 364-370, New Jersey, EEUU, 1995.
- [Durbá 00] P. Durbá, "Las estaciones de referencia del sistema GALILEOSAT: IMS y OSS", *Actas de la 4ª Semana de Geomática, Cartografía y Navegación*, pp. 35-43, Sitges, Barcelona, 2000.
- [Edan 00] Y. Edan, D. Rogozin, T. Flash, G. E. Miles, "Robotic melon harvesting", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 16., No. 6, 2000.
- [Elkaim 96] G. H. Elkaim, M. L. O'Connor, T. Bell, B. W. Parkinson, "System identification of a farm vehicle using carrier-phase differential GPS", *Proc. of the ION GPS-96*, pp. 485-494, Kansas City, EEUU, 1996.

- [Enge 99a] P. Enge, P. Misra, "Scanning the use technology: Special issue on global positioning system", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 8, pp. 3-15, 1999.
- [Enge 99b] P. Enge, "Local area augmentation of GPS for the precision approach of aircraft", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 8, pp. 111-132, 1999.
- [ESA 99] European Spacial Agency, *European geoestationary navigation overlay service (EGNOS), bilateral agreement signed*. [Online], W.W.W.: <http://www.esa.int/Press/99/press04.html>, 1999.
- [Everett 95] H. R. Everett, *Sensors for mobile robots*, Wellesley, Massachusetts, EEUU, 1995.
- [Fernández 97] J. A. Fernández, G. Seco, "Sistemas de posicionamiento: de GPS a GNSS", *Mundo Electrónico*, No. 280, pp. 46-52, 1997.
- [Filip 98] A. Filip, "Signals of change: Czech rails DGPS Train Locator Trials", *GPS World Magazine*, pp. 34-43, 1998.
- [Fisher 99] S. C. Fisher, K. Ghassemi, "GPS IIF- The Next Generation", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 24-47, 1999.
- [Fitzpatrick 89] K. W. Fitzpatrick, J. L. Ladd, "Locomotion emulator: A tesbed for navigation research", *World Conference on Robotics Research: The Next Five Years and Beyond*, pp. 250-256, 1989.
- [Flynn 88] A. M. Flynn, R. A. Brooks, "MIT Mobile Robots: What is next?", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 611-617, 1988.
- [Fugro 00] Fugro Group Company, "3100LR12: User manual", 2000.
- [Furuno 95] Furuno Electric Co. LTD, "GPS receiver model GN-74", Technical Information, Publication #TI-48-006-I005-1, Japón, 1995.
- [García JC 00a] J. C. García, J. Ureña, M. Mazo, D. W. Berns, M. Marrón, M. Escudero, "Detección de marcas codificadas para la autolocalización de una silla de ruedas", *Actas del 1^{er} Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo para la Discapacidad (IBERDISCAP 2000)*, pp. 129-132, Madrid, 2000.
- [García JC 00b] J. C. García, J. Ureña, M. Mazo, D. W. Berns, M. Marrón, M. Escudero, "Ayuda a la navegación de sillas de ruedas autónomas mediante marcas artificiales", *Actas del 1^{er} Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo para la Discapacidad (IBERDISCAP 2000)*, pp. 133-136, Madrid, 2000.

- [García-Pérez 00] L. García, J. M. Cañas, M. C. García-Alegre, P. Yañez, D. Guinea, "Fuzzy control of an electropneumatic actuator", *Proc. of the X Spanish Congress on Technology and Fuzzy Control*, Sevilla, 2000.
- [García-Alegre 93a] M. C. García-Alegre, "Knowledge-based hierarchical learning for a multi-legged robot", *SPIE Robotics and Machine Perception Newsletter*, Vol.2, No.2, 1993.
- [García-Alegre 93b] M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, J. Gasós, J. Salido, "Optimization of fuzzy behaviour-based robots navigation in partially known industrial environment", *Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems*, pp. 50-54, Houston, EEUU, 1993.
- [García-Alegre 95] M. C. García-Alegre, P. Bustos, D. Guinea, "Complex behaviour generation on autonomous robots: A case of study", *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics*, pp. 1729-1734, Vancouver, 1995.
- [García-Alegre 97] M. C. García-Alegre, D. Guinea, "Building and architecture for a farming robot", *Proc. of the International Workshop on Robotics and Automated Machinery for Bio-Robotics*, pp. 255-260, Gandía, 1997.
- [García-Alegre 98] M. C. García-Alegre, F. Recio, "Basic visual and motor agents for increasingly complex behaviour generation on a mobile robot", *Autonomous Robots*, No. 5, pp. 1-10, 1998.
- [García-Alegre 01] M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, L. García, A. Pozo-Ruz, R. Martínez, D. Guinea, "Autonomous lawnmower in agriculture tasks", *Aceptado en el 3rd European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Montpellier, Francia, 2001.
- [González 92] J. González, A. Stentz, A. Ollero, *An iconic position estimator for a 2-D laser rangefinder*, Technical Report CMU-RI-TR-92-04, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, EEUU, 1992.
- [González 96] J. González, A. Ollero, "Estimación de la posición de un robot móvil", *Informática y Automática*, Vol. 29, No. 4, pp. 3-18, 1996.
- [Grieco 98] J. C. Grieco, M. Prieto, M. Armada, P. González de Santos, "A six-legged climbing robot for high payloads", *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 250-255, Trieste, Italia, 1998.
- [Grover 97] R. Grover, P. Y. Hwang, *Introduction to random signals and applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, 3^{er} Edition, 1997.

- [Guevara 98] M. Guevara, "Protegiendo los nevados andinos y la amazonía ecuatoriana", *Geoconvergencia: Aplicaciones de Tecnologías Geográficas Integradas*, pp. 12-18, 1998.
- [Guillo 99] E. Guillo, M. Gautier, "Dynamic modelling and identification of a compactor", *Proc of the XVI IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 61-71, Madrid, 1999.
- [Guinea 90] D. Guinea, L. J. Barrios, F. Betancourt, A. Ruiz, "Multi-sensor information integration", *Sensor Review*, Vol. 3, No. 3, pp. 133-136, 1990.
- [Guinea 93] D. Guinea, M. C. García-Alegre, P. Kalata, A. Lacaze, A. Meystel, "Robot learning to walk: an architecture problem for intelligent controllers", *Proc. of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 493-498, Chicago, EEUU, 1993.
- [Guinea 98] D. Guinea, G. S. Mezquita, "Networking intelligent sensign for transport monitoring", *Proc. of the EUROSENSORS XII*, pp. 949-952, Southampton, United Kindom, 1998.
- [Guinea 01] D. Guinea, A. Pozo-Ruz, L. García, M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, F. Sandoval, "Architecture fundamentals for an outdoor autonomous mobile robot", *enviado a SPIE, Intelligent Systems and Advance Manufacturing*, Massachusetts (EEUU), 2001.
- [Healey 93] A. J. Healey, D. Lienard, "Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.
- [Henning 98] W. Henning, F. Hickman, H. Choset, "Motion planning for serpentine robots", *Proc. of the ASCE Space Robotics, Alburquerque*, New Mexico, 1998.
- [Henri 98] P. D. Henri, J. M. Hollerbach, A. Nahvi, "An analytical and experimental investigations of a jet pipe controlled electropneumatic actuator", *IEEE Transactions on Robotics and Autimation*, Vol. 14, pp. 601-611, 1998.
- [Heredia 99] J. G. Heredia, *Seguimiento autónomo de caminos en robots móviles. Análisis de estabilidad*, Tesis Doctoral, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, 1999.
- [Herring 96] T. A. Herring, "The global positioning system", *Scientific American*, pp. 32-38, 1996.
- [Hofmann 97] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, EEUU, 1997.

- [Holland 85] J. M. Holland, "Rethinking robot mobility", *Robotics Age*, Vol. 7, No. 2, pp. 12-13, 1985.
- [Hollis 77] R. Hollis, "Newt: A mobile, cognitive robot", *Byte*, Vol. 2, No. 6, pp. 30-45, 1977.
- [Högström 94] T. Högström, T. Hultberg, A. Wernersson, *A semi autonomous robot with rate gyro supported control and video camera*, Robotics/Autonomous Mechanical Systems, Linköping University, 1994.
- [Huff 95] M. K. Huff, "Omnistar, a versatile DGPS positioning tool", 1995.
- [Hurn 89] J. Hurn, *GPS: Una guía para la próxima utilidad*, Trimble Navigation, 1989.
- [Infiesta 98] J. L. Infiesta, J. Roca, J. L. Pérez, "Sobre el carril con los trenes de Cataluña", *Geoconvergencia: Aplicaciones de Tecnologías Geográficas Integradas*, pág. 20-29, 1998.
- [Ishii 94] K. Ishii, "A quick adaptation method in a neural network based control system for AUVs", *Proc of the Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 269-274, 1994.
- [Jarvis 95] R. Jarvis, "An all-terrain intelligent autonomous vehicle with sensor fusion based navigation capabilities", *Control Engineering Practice*, Vol. 4, No. 4, pp. 481-486, 1996.
- [JPL 92] JPL, "Robotics vehicles for planetary exploration", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Niza, France, 1992.
- [Kaiser 95] M. Kaiser, "Using machine learning techniques in real-world mobile robots", *IEEE Expert System & their Applications*, pp. 37-45, 1995.
- [Kam 97] M. Kam, X. Zhu, P. Kalata, "Sensor fusion for mobile robot navigation", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 1, pp. 108-119, 1997.
- [Kaplan 96] E.D. Kaplan, *Understanding GPS: Principles and applications*, Artech House, 1996.
- [Kawaguchi 96] K. Kawaguchi, "Design of an autonomous underwater robot: ODIN II", *World Autonomous Congress*, Montpellier, Francia, 1996.
- [Kumar 89] V. R. Kumar, K. J. Waldron, "A Review of Research on Walking Vehicles" en O. Khatib, J. J. Craig & T. Lozano-Pérez (Eds.), *Robotics Review*, pp. 243-266, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [Langley 99] R. B. Langley, "RTK GPS", *GPS World Magazine*, No. 1, 1999.
- [Larsson 96] U. Larsson, J. Forserg, A. Wernersson, "On robot navigation using identical landmarks: Integrating measurements from a time-of-flight laser", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 3, 1996.

- [Laumond 94] J. P. Laumond, P. E. Jacobs, M. Taix, R. M. Murray, "A motion planner for nonholonomic mobile robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 577-593, 1994.
- [Lewandowski 99] W. Lewandowski, J. Azoubib, W. Klepczynski, "GPS: Primary tool for time transfer", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 163-172, 1999.
- [Loeb 95] H. Loeb, S. Ygorra, M. Monsion, "High precision autopilot design for small ships", *Proc. of the IFAC ICASAV-95*, pp. 123-127, Vol. 1, Toulouse, Francia, 1995.
- [Luo 89] R. C. Luo, M. G. Kay, "Multisensor integration and fusion in intelligent systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 19, No. 15, pp. 901-931, 1989.
- [Madarasz 86] R. L. Madarasz, L. C. Heiny, R. F. Crop, N. M. Mazur, "The design of an autonomous vehicle for the disabled", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 3, pp. 117-126, 1986.
- [Madhavan 99] R. Madhavan, E. Nettleton, E. Nebot, G. Dissanayake, J. Cunningham, H. Durrant-Whyte, P. Corke, J. Roberts, "Evaluation of internal navigation sensor suites for underground mining vehicle navigation", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, EEUU, pp. 999-1004, 1999.
- [Mandow 95] A. Mandow, J. L. Martínez, V. F. Muñoz, J. Gómez-de-Gabriel, A. Ollero, A. J. Reina, "Sonar-based navigation in constrained environments with the Aurora mobile robot", *Proc. of the 7th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 785-790, Barcelona, 1995.
- [Mandow 96] A. Mandow, J. M. Gómez-de-Gabriel, J. L. Martínez, V. F. Muñoz, A. Ollero, A. García-Cerezo, "The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 3, No. 4, pp. 18-28, 1996.
- [Manzano 98] F. Manzano-Aguilaro, J. E. Meroño, M. Pérez, M. López, V. Ortiz, "Ayudas de superficie y política agraria con una aplicación GPS", *Geoconvergencia: Aplicaciones de Tecnologías Geográficas Integradas*, pp. 38-44, 1998.
- [Marchant 97a] J. Marchant, T. Hague, N. Tilletm, J.M. Sanchiz, "Research on an autonomous vehicle for precise plant treatments", *Proc. of Bio-Robotics'97*, pp.237-242, 1997.
- [Marchant 97b] J. Marchant, T. Hague, N. Tilletm, "Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle", *Computers and Electronics in Agriculture*, No. 16, pp. 165-175, 1997.

- [Martínez 94] J. L. Martínez, *Seguimiento automático de caminos en robots móviles*, Tesis Doctoral, Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga, 1994.
- [Martínez 98] J. L. Martínez, A. Pozo-Ruz, S. Pedraza, R. Fernández, "Object following and obstacle avoidance using a laser scanner in the outdoor mobile robot Auriga- α " *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 204-209, Victoria B. C., Canada, 1998.
- [Martínez R 98] O. Martínez Robaina, "Carreteras sobre el mar: una aplicación en Cuba del GPS para levantamientos topográficos", *Geoconvergencia: Aplicaciones de Tecnologías Integradas Geográficas*, pp. 30-34, 1998.
- [Mazo 95a] M. Mazo, "Electronic control of a wheelchair guided by voice commands", *Control Engineering Practice*, Vol. 3, No. 5, pp. 665-674, 1995.
- [Mazo 95b] M. Mazo, "Wheelchair for physically disabled people with voice, ultrasonic and infrared sensor control", *Autonomous Robots*, Vol. 2, No. 3, pp. 203-224, 1995.
- [Miller 98] J. R. Miller, O. Amidi, "3-D Mapping with the CMU autonomous helicopter", *Proc. of the 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 1998.
- [Miller 99] J. R. Miller, O. Amidi, M. Delouis, "Arctic tests flights of the CMU autonomous helicopter", *Proc. of the Association for Unmanned Vehicle Systems International, 26th Annual Symposium*, 1999.
- [Misra 99] P. Misra, B. P. Burke, M. M. Pratt, "GPS Performance in Navigation", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 65-85, 1999.
- [Miyake 97] N. Miyake, T. Aono, K. Fujui, Y. Matsuda, S. Hatsumoto, "Position estimation and path control of an autonomous land vehicle", *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97)*, pp. 690-96, 1997.
- [Molina 00] R. Molina Mesa, *Navegación de robots móviles en exteriores mediante GPS diferencial*. Proyecto Fin de Carrera. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, E.T.S. Ingenieros Industriales, Univeridad de Málaga, 2000.
- [Montenegro 99] M. F. Montenegro, L. de Souza, "Autonomous dirigible navigation using visual tracking and pose estimation", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2584-2589, Detroit, Michigan, 1999.
- [Moravec 80] H. P. Moravec, "Obstacle avoidance and navigation in real world by seeing robot rover", Tesis Doctoral, Dpt. of Computer Science, Stanford University, 1980.

- [Moravec 85] H. P. Moravec, *Robotics*, Omni Publications, New York, EEUU, 1985.
- [Murphy 97] J. Murphy, "The Atacama Desert Trek", Online: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/lri-13/www/atacama-trek/nomad4kids/kidsinstruments.html>, 1997
- [Myers 95] G. Myers, "Navstar Global Positioning System", 1995.
- [M3S 97] *M3S specification: An intelligent integrated and modular system for the rehabilitation environment*, Working Group ISO/TC-173/SC-1/WG-7, Version 2.00, 1997.
- [NMEA 92] National Marine Electronics Association, *NMEA-0183 Standard for interfacing marine electronic device version 2.00*, 1992.
- [Nagatani 98] K. Nagatani, H. Choset, S. Thrun, "Towards exact localization without explicit localization with the generalized voronoi graph", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 342-348, Leuven, Bélgica, 1998.
- [Phadke 93] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems", *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 10-15, 1993.
- [Parkinson 96] B. W. Parkinson, J. J. Spilker. *Global positioning system: Theory and applications*, Vol. 2, 1996.
- [Pedraza 97] S. Pedraza, A. Pozo-Ruz, H. Roth, K. Shilling, "Outdoor navigation of micro-rovers", *Proc. of the IFAC Workshop on Intelligent Components for Vehicles (ICV'98)*, pp. 253-257, Sevilla, 1997.
- [Pedraza 00] S. Pedraza, *Modelado y análisis de vehículos de cadenas para la navegación autónoma*. Tesis Doctoral, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, 2000.
- [Pomerlau 93] D. A. Pomerlau, *Neural Perception for Mobile Robot Guidance*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1993.
- [Pozo-Ruz 96] A. Pozo-Ruz, J. L. Martínez, "Simulación de la navegación de robots móviles en exteriores mediante Matlab", *Actas del Congreso de Usuarios de Matlab*, pp. 147-155, Madrid, 1996.
- [Pozo-Ruz 97] A. Pozo-Ruz, J. L. Martínez, A. García-Cerezo, "Integration of a rotary sonar in the mobile robot RAM-2", *Intelligent Components for Control Applications*, Folloy Pergamon, United Kindom, 1997.
- [Pozo-Ruz 98] A. Pozo-Ruz, J. L. Martínez, A. García-Cerezo, "A new satellite selection criterion for DGPS using two low-cost receivers", *Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1883-1888, Leuven, Bálgica, 1998.

- [Pozo-Ruz 98b] A. Pozo-Ruz, L. García, D. Guinea, M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, *Sistema de posicionamiento global: Análisis de medidas absolutas con cuatro receptores GPS*, Informe Técnico TR-12/98a, Dpto. de Sistemas, Instituto de Automática Industrial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1998.
- [Pozo-Ruz 98c] A. Pozo-Ruz, L. García, A. Ribeiro, D. Guinea, M. C. García-Alegre, *Análisis comparativo de tres receptores GPS en modo diferencial: Caracterización del ruido*, Informe Técnico TR-12/98b, Dpto. de Sistemas, Instituto de Automática Industrial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1998.
- [Pozo-Ruz 99] A. Pozo-Ruz, C. Urdiales, A. Bandera, E. J. Pérez, F. Sandoval, "A path tracking method for autonomous mobile robots based on grid decomposition", *Proc. of the 7th International Symposium on Intelligent Robotic Systems*, pp. 456-470, Coimbra Portugal, 1999.
- [Pozo-Ruz 00a] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea, F. Sandoval, "Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro", *Mundo Electrónico*, No. 306, pp. 54-59, 2000.
- [Pozo-Ruz 00b] A. Pozo-Ruz, M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, L. García, D. Guinea, F. Sandoval, "Localización de vehículos: fusión de medidas GPS y odometría", *Mundo Electrónico*, No: 308, pp 46-54, 2000.
- [Pozo-Ruz 00c] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea, F. Sandoval, "Modelado de la incertidumbre espacial para la localización de móviles en exteriores", *Actas de la 4ª Semana de Geomática, Cartografía y Navegación*, pp. 231-242, Sitges, Barcelona, 2000.
- [Pozo-Ruz 01a] A. Pozo-Ruz, M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, L. García, D. Guinea, F. Sandoval, "Fusion of odometry and GPS for location of outdoor vehicles. Application to the outdoor mobile robot ROJO", enviado a *GPS World Magazine*.
- [Pozo-Ruz 01b] A. Pozo-Ruz, L. García, D. Guinea, M. C. García-Alegre, A. Ribeiro, F. Sandoval, "GPS and odometers data fusion for outdoor robots continuous positioning", enviado a *SPIE, Intelligent Systems and Advance Manufacturing, Massachusetts (EEUU), 2001*.
- [Preciado 89] A. Preciado, D. Meizel, *Dynamics of the vehicle Romano-Sapiens*, Universite de Technologie de Compiegne, Francia, 1989.
- [Prieto 99] J. L. Prieto, "Sensores magnéticos híbridos de material piezoeléctrico y ferromagnético", *Revista española de física*, Vol. 13, No. 3, pp. 37-39, 1999.

- [Quinn 96] B. Quinn, D. Shute, *Windows sockets network programming*, Addison Wesley, 1996.
- [Raibert 89] M. H. Raibert, "Legged robots" en M. Brady (Ed.), *Robotics Science*, pp. 563-594, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [Raibert 93] M. H. Raibert, J. K. Hodgings, "Legged robots" en R. D. Beer, R. E. Ritzmann & T. McKenna (Eds.), *Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics*, pp 319-354, Academic Press, Boston, 1993
- [Raven 96] P. Raven, S. Sandmann, G. Schoemackers, "RASANT: Radio Aided Satellite Navigation Technique", *EBU Technical Review*, No. 267, pp. 27-31, 1996.
- [Reister 93] D. B. Reister, M. A. Unseren, "Position and constrain force control of a vehicle with two or more steerable drive wheels", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 6, pp. 723-731, 1993.
- [Reyes 99] C. Reyes, S. Alcalde, I. Hernán, J. Reviejo, R. García-Rosa, T. de Pedro, "Controlador de vehículos sin conductor: simulación e instrumentación", *Proc. of the 8th Conference of Spanish Artificial Intelligence (CAEPIA99)*, pp. 9-16, Murcia, 1999.
- [Rimolo 00] M. Rimolo, A. Veca, C. Vacca, S. González, S. Gonzales, "Anteojo y bastón inteligente para ciegos y disminuidos visuales severos", *Actas del 1^{er} Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo para la Discapacidad (IBERDISCAP 2000)*, pp. 157-162, Madrid, 2000.
- [Rintanen 96] K. Rintanen, H. Mäkelä, K. Koskinen, J. Puputti, M. Sampo, M. Ojala, "Development of an autonomous navigation system for an outdoor vehicle", *Control Engineering Practice*, Vol. 4, No. 4, pp. 499-505, 1996.
- [Riulas 00] J. Riulas, "RASANT: Comportamiento de navegadores mejorados por señales RASANT en ciudades", *Actas de la 4^o Semana de Geomática, Cartografía y Navegación*, pp. 243-245, Sitges, Barcelona, 2000.
- [RNE 00] Radio Nacional de España (RNE), *Proyecto RECORD*, [Online], W.W.W.: <http://www.rne.es>, 2001
- [Rodríguez 00] A. Rodríguez, N. Sosa, L. F. Rodríguez, H. Chulani, L. Díaz, J. L. González-Mora, "Percepción del entorno en personas ciegas a través de un estímulo sonoro espacial virtual generado por computador", *Actas del 1^{er} Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo para la Discapacidad (IBERDISCAP 2000)*, pp. 81-84, Madrid, 2000.
- [Roumeliotis 99] S. I. Roumeliotis, G. S. Sukhatme, G. A. Bekey, "Circumverting dynamic modeling : evaluation of the error-state Kalman filter applied to mobile robot localization",

- Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1656-1663, Detroit, Michigan, 1999.
- [RTCM 90] Radio Technical Commission for Maritime Services, *RTCM recommended standards for differential Navstar GPS service, version 2.0 RTCM Special Committee No. 104*, Washington DC, EEUU, 1990.
- [RTCM 94] Radio Technical Commission for Maritime Services, *RTCM recommended standards for differential Navstar GPS service, version 2.1 RTCM Special Committee No. 104*, Washington DC, EEUU, 1994.
- [RTCM 98] Radio Technical Commission for Maritime Services, *RTCM recommended standards for differential global navigation satellite system, version 2.2 RTCM Special Committee No. 104*, Virginia, EEUU, 1998.
- [Ruegg 98] D. J. Ruegg, "A towering achievement: Keeping the auckland sky tower on the straight and narrow", [Online], W.W.W.: <http://www.gpsworld.com/feature/0298ruegg/0298feature.html>, 1998.
- [Sanchiz 98] J. M. Sanchiz, F. Pla, J. A. Marchant, "An approach to the vision task involved in an autonomous crop protection vehicle", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, No. 11, pp.175-187, 1998.
- [Sasiadek 99] J. Z. Sasiadek, Q. Wang, "Sensor fusion based on fuzzy Kalman filtering for autonomous robot vehicle", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2970-2975, Detroit, Michigan, 1999.
- [Scheding 99] S. Scheding, G. Dissanayake, E. M. Nebot, H. Durrant-Whyte, "An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 1, pp.85-95, 1999.
- [Schönberg 94] T. Schönberg, M. Ojala, E. Koskimäki, J. Sumoela, A. Halme, "A small scaled autonomous test vehicle for developing autonomous off-road applications", *International Conference on Machine Automation*, pp. 143-157, Tampere, Finland, 1994.
- [Schönberg 95] T. Schönberg, M. Ojala, J. Suomela, A. Torpo, A. Halme, "Positioning an autonomous off-road vehicle using fused DGPS and inertial navigation", *Proc. of the 2nd IFAC Conference on Intelligent Vehicle*, pp. 226-231, Finlandia, 1995.
- [Shaffer 92] G. Shaffer, A. Stentz, "A robotic system for underground coal mining", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992.

- [Shaw 99] M. Shaw, P. Levin, J. Martel, "The DoD: Stewards of a global information resource, the navstar global positioning system", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 16-23, 1999.
- [Shiller 93] Z. Shiller, W. Serate, M. Hua, "Trajectory planning of tracked vehicles", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 796-801, Atlanta, GA, USA, 1993.
- [Simsarian 95] K. T. Simsarian, M. J. Mataric, "Learning to cooperate using two six-legged mobile robots", *Proc. of the 3th European Workshop of Learning Robots*, pp. 51-80, 1995
- [Singh 97] S. Singh, "State of the art in automation of earth-moving", *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2, No. 4, 1997.
- [Smith 86] R. Smith, P. Cheeseman, "On the representation and estimation of espatial uncertainty", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 4, 1986.
- [Sonnenberg 88] G. J. Sonnenberg, "The global positioning system", *Radar and Electronic Navigation*, Butterworths, 1988.
- [Stentz 98] A. Stentz, J. Bares, S. Singh, P. Rowe, "A robotic excavator for autonomous truck loading", *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1885-1893, Victoria B.C., Canada, 1998.
- [Sugeno 99] M. Sugeno, H. T. Nguyen, "Development of an intelligent unmanned helicopter" en N. R. Prasad (Ed.), *Fuzzy modeling and control: Selected work of M. Sugeno*, CRC Press, 1999.
- [Tabaii 94] S. S. Tabaii, "Hyrid adaptative control of autonomous underwater vehicle", *Proc. of the Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 275-282, 1994.
- [Tachi 85] S. Tachi, K. Komoriya, "Guide dog robot", *2nd International Symposium on Robotics Research*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, EEUU, 1985.
- [Talaya 00] J. Talaya, J. Mesa, J. Segarra, I. Colomina, "El sistema RASANT en Cataluña", [Online], W.W.W.: <http://www.icc.es/rasant/adsr.html>, 2000.
- [Tecnología GPS 98] Tecnología GPS, S.A., "TGPS-RASANT: Manual de usuario", 1998.
- [Thorpe 88] C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kanade, S. A. Shafer, "Vision and navigation for the Carneige Mellon Navlab", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, pp. 362-373, 1988.

- [Thorpe 90] C. E. Thorpe, *Vision and navigation: The Carnegie Mellon Navlab*, Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [Thorpe 95] C. E. Thorpe, M. Hebert, "Mobile robotics: Perspectives and realities", *Proc. of the 7th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 497-506, Barcelona, España, 1995.
- [Thorpe 98] C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kanade, S. A. Shafer, "Vision and Navigation for the Carnegie Mellon Navlab", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, pp. 362-373, 1998.
- [Trevelyan 97] J. Trevelyan, "Simplifying robotics: A challenge for research", *Robotics and Autonomous Systems*, No. 21, pp. 207-220, 1997.
- [Trimble 98a] Trimble Navigation Limited, "ACEII GPS: System reference manual2, 1998.
- [Trimble 98b] Trimble Navigation Limited, "GPS MS750: Operation manual", 1998.
- [Urdiales 99] C. Urdiales, *Arquitectura de control de movimiento y exploración para un agente autónomo*, Tesis doctoral, Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga, 1999.
- [Van del Molen 93] Van del Molen, *Modelling and control of a wheeled mobile robot with friction*, Industrial Control Center, University of Strathclyde, Glasgow, United Kindom, 1993.
- [Vannicola 95] F. V. Vannicola, "NAVSTAR global positioning system", 1995.
- [Vetter 95] A. A. Vetter, "Quantitative evaluation of DGPS guidance for ground-based agricultural applications", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 459-464, 1995.
- [Wang 88] C. M. Wang, "Location estimation and uncertainty analysis for mobile robots", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1230-1235, Philadelphia, EEUU, 1988.
- [Ware 95] R. Ware, S. Businger, *Global positioning finds application in geosciences research*, University of Hawaii, Honolulu, 1995.
- [Watanabe 90] M. Watanabe, Y. Yuta, "Position estimation of mobile robots with inertial and external sensors using uncertainty evolution technique", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2011-2016, 1990.
- [Watanabe 92] M. Watanabe, K. Onoguchi, I. Kweon, Y. Kuno, "Architecture of behaviour-based mobile robot in dynamics environments", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2711-2718, Nice, Francia, 1992.

- [Waxman 87] A. M. Waxman, "A visual navigation system for autonomous land vehicles", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 2, pp. 124-141, 1987.
- [Weber 95] L. Weber, A. Tiwari, "DGPS architecture based on separating error components, virtual reference station and FM subcarrier broadcast", *Proc. of the ION Annual Meeting*, 1995.
- [Whitcomb 99] L. Whitcomb, D. Yoerger, H. Singh, "Advances in doppler-based navigation of underwater robotic vehicles", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 399-406, Detroit, Michigan, EEUU, 1999.
- [White House 00] The White House Office of the Press Secretary, "Statement by the President regarding the United States' decision to stop degrading global positioning system accuracy", May 1, 2000, [Online], W.W.W.: <http://www.navcen.uscg.mil/gps/policynotes/SA.htm>.
- [Whittaker 89] W. L. Whittaker, *Field Robotics: A national challenge, a national opportunity*. Informe presentado a la Ü.S. House of Representatives. Committee on Science and Space Technology", 1989.
- [Yoerger 91] D. R. Yoerger, J. E. Slotine, "Adaptative sliding control of an experimental underwater vehicle", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, USA, 1991.
- [Yuh 99] J. Yuh, J. Nie, C.S.G. Lee, "Experimental study on adaptative control of underwater robots", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 393-398, Detroit, Michigan, EEUU, 1999.
- [Zadeh 73] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, Vol. 1, pp. 28-44, 1973.
- [Zalzala 96] A. M. Zalzala, A. S. Morris, *Neural networks for robotics control*, Ellis Horwood, 1996.
- [Zimmerman 94] K. R. Zimmerman, R. H. Cannon, "GPS based control for space vehicle rendezvous", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, EEUU.