



**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**Tesis Doctoral**

**AUTONOMIA ADAPTABLE POR PREDICCIÓN  
INDIVIDUALIZADA EN CARMEN**

Manuel Fernández Carmona

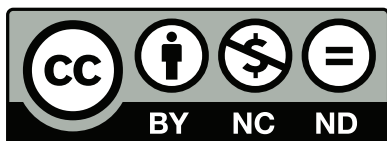
MÁLAGA, 2014



**SPICUM**  
servicio de publicaciones

AUTOR: Manuel Fernández Carmona

EDITA: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:

Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):

[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)



**UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**Tesis Doctoral**

**AUTONOMIA ADAPTABLE POR PREDICCIÓN  
INDIVIDUALIZADA EN CARMEN**

AUTOR: Manuel Fernández Carmona

Ingeniero de Telecomunicación

2014



D<sup>a</sup> CRISTINA URDIALES GARCÍA, PROFESORA TITULAR DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

CERTIFICA:

Que D. Manuel Fernández Carmona, Ingeniero de Telecomunicación, ha realizado en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga, bajo mi dirección, el trabajo de investigación correspondiente a su Tesis Doctoral titulada:

“AUTONOMIA ADAPTABLE POR PREDICCIÓN INDIVIDUALIZADA EN CARMEN”

Revisado el presente trabajo, estimo que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que conste a efectos de lo establecido en el Real Decreto 1393/2007 **regulador de los estudios de Tercer Ciclo-Doctorado, AUTORIZO la presentación de esta Tesis en la Universidad de Málaga.**

**Málaga, a 10 de enero de 2014**

**Fdo. Cristina Urdiales García**

Profesora Titular del Departamento de Tecnología Electrónica



**Departamento de Tecnología Electrónica**

**E.T.S.I. Telecomunicación**

**Universidad de Málaga**

**TESIS DOCTORAL**

**AUTONOMIA ADAPTABLE POR PREDICCIÓN  
INDIVIDUALIZADA EN CARMEN**





## Índice general

<b>1. Introduction: On adaptive assistance</b>	<b>1</b>
1. Disability and Assistive Devices . . . . .	1
2. Profiling and modulation . . . . .	2
3. Motion planning and space representation . . . . .	4
4. Document structure . . . . .	6
<b>2. Perfilado y evaluación de usuarios</b>	<b>9</b>
1. Población objetivo . . . . .	9
2. Mecanismos de Evaluación . . . . .	10
2.1. Métricas de condición . . . . .	10
2.2. Métricas de capacidad . . . . .	15
2.3. Alcance y limitación . . . . .	18
3. Patrón asistivo . . . . .	19
4. Experimentos y resultados . . . . .	23
5. Conclusiones . . . . .	28
<b>3. Planificador</b>	<b>31</b>
1. Introducción . . . . .	31
2. Modelado del entorno centrada en usuario . . . . .	32
2.1. Estado del arte . . . . .	32
2.2. Segmentación . . . . .	34
2.3. Creación del grafo dirigido del entorno . . . . .	37
3. Navegación personalizada . . . . .	39
3.1. Estado del arte . . . . .	39
3.2. Búsqueda de caminos . . . . .	40
4. Experimentos . . . . .	42
5. Conclusiones . . . . .	46
<b>4. Navegación Local</b>	<b>47</b>
1. Introducción . . . . .	47
2. Estado del Arte . . . . .	47

3.	Navegación óptima . . . . .	48
4.	Control colaborativo . . . . .	49
4.1.	Suavidad . . . . .	51
4.2.	Directividad . . . . .	51
4.3.	Seguridad . . . . .	52
4.4.	El control colaborativo como función de navegación . . . . .	52
4.5.	Continuidad . . . . .	52
4.6.	Función polar . . . . .	53
4.7.	Máximo en las fronteras . . . . .	54
4.8.	Función Morse . . . . .	55
5.	Demostración gráfica . . . . .	55
5.1.	Factores aislados vs. eficiencia conjunta . . . . .	57
5.2.	Isogramas basados en perfil de usuario . . . . .	57
5.3.	Isogramas de control colaborativo . . . . .	58
6.	Control colaborativo modulado . . . . .	59
7.	Experimentos y resultados . . . . .	63
8.	Conclusiones . . . . .	68
<b>5.</b>	<b>Experimentación y resultados</b>	<b>69</b>
1.	Descripción de la prueba . . . . .	69
2.	Resultados y discusión . . . . .	71
3.	Conclusiones . . . . .	75
<b>6.</b>	<b>Conclusions and future work</b>	<b>77</b>
1.	Conclusions . . . . .	77
2.	Future work . . . . .	79
	<b>Glosario</b>	<b>83</b>
	<b>Siglas</b>	<b>87</b>
	<b>Glosario de Símbolos</b>	<b>89</b>



## Agradecimientos

Este trabajo no es mío. Así de sencillo. Lo que aquí se recoge sólo ha sido posible gracias al duro trabajo de muchas personas. Yo tan sólo soy el eslabón más reciente en esta ya larga cadena. Tantos nombres que no podría ponerlos todos, pues la lista sería larguísima, y a buen seguro mi mala cabeza olvidaría alguno importante. Sin embargo, es de justicia agradecerles a todos ellos su ingente labor, sin la que este trabajo ni siquiera existiría. Y así voy a hacerlo.

Agradecer a los pacientes del Santa Lucía por su infinita paciencia con todos nosotros. Su entusiasta participación ha hecho posible todo esto y para mí han sido un ejemplo de superación y perseverancia. Al equipo del Santa Lucía, por recibirnos con los brazos abiertos y brindarnos sus instalaciones. Ellos saben marcar la diferencia aún cuando los tiempos han sido muy duros con ellos.

Claro que nunca habría llegado ahí de no ser por el proyecto SHARE-it. Cada semana era una crisis, pero con aquel equipo nada era irresoluble, o casi. Y que decir de nuestro equipo local, el grupo ISIS. Son muchos los compañeros que han pasado por el laboratorio, y todos han aportado mucho a este trabajo. Aunque pase el tiempo, saben que el laboratorio es como una familia. No me podía olvidar de agradecer al proyecto SIAD P07-TIC-03391, con el que he podido concluir este trabajo. Otra vez acosados por las dificultades, y una vez más viendo como con ingenio se podía con todo. Ellos me han demostrado que la profesionalidad se prueba con actos y no palabras rimbombantes. Ese fantástico grupo, en gran medida este nuestro departamento y en parte esta escuela que me formó, son obra de otro grande. Agradecerle su dedicación a la investigación y a la docencia.

Durante estos años en la escuela, he podido compartir mi camino con algunos de los mejores amigos de mi vida. Las mentes más brillantes que he conocido, no siempre justamente tratadas por nuestro imperfecto sistema. Tanto tiempo aquí sin vosotros habría sido insoportable.

De soportarme sabe mucho mi familia, que ha cargado conmigo todos estos años con cariño y comprensión incondicionales. Y con familia me refiero también la que me tiene adoptado en Antequera casi como suyo propio. Ya es mucho (mucho) tiempo apareciendo por allí de la mano de su hija. Mano que no pienso soltar puesto que es la mujer más increíble, fuerte y cariñosa del mundo. Hay días que no me creo la suerte que tuve de dar con Ana. Tampoco quiero olvidar a mi hermano y hermanas, que son un modelo para mí, todos ellos. Ni a mis abuelos, que dedicaron su vida a sus nietos, para ellos mi más tierno recuerdo. Mi madre, enamorada de la historia, que ha tenido una visión de futuro privilegiada. Ella nos inculcó el ansia de estudiar, que le había sido negada a ella. Ella me alentó a aprender más allá de la escuela y supo reconocer que los juegos de rol y la ciencia ficción eran beneficiosos, en tanto en cuanto me hacían leer, pensar e imaginar. Gracias a ella, la ciencia ficción siempre ha sido un referente en mi vida. A través de la fantasía no he vivido una vida, sino miles.

Y a Cristina, sinceramente no sé que decir. Es tanto lo que ha hecho por mí que no es humanamente posible agradecerlo debidamente. No podría enumerar las veces que me ha ayudado en lo profesional, lo humano, lo cotidiano o lo excepcional. Las veces que me ha dado un consejo, una guía, un apoyo, un empujón o un capón y una bronca si era preciso. Más que una jefa o directora de tesis es una mentora para mí. En lo personal, una verdadera amiga, la mayor fan de la ciencia ficción. Creo que es ahí donde mejor alcanzaría a definir nuestro vínculo. Si ella fuera Kirk, yo sería Spock. Si fuera Malkon, yo sería Zoe. Si fuera Han, yo sería Chewie. Y si fuera Ivanova, probablemente sería Garibaldi.

Y en todas y cada una de esas vidas imposibles, estaría otra vez rodeado de la gente excepcional que me acompaña en este viaje fantástico. A todos, gracias.

### Asistivo vs. asistido

"*Asistivo*" es un término proveniente del inglés *assistive* carente de traducción directa al castellano. Lo habitual es traducir "*assistive*" por "*asistido*", pero esto conlleva una pérdida de su significado original. Y es que el término original "*assistive*" describe específicamente algo diseñado para compensar una diversidad funcional, o más concretamente diseñado para personas con diversidades funcionales. Por contra, "*asistido*" es una palabra más genérica que tan solo hace referencia al uso de ayuda por medios mecánicos. Por lo tanto es correcto, pero mucho menos preciso.

El texto utilizará en lo que sigue la palabra "*asistivo*", con la intención de hacer énfasis en el objetivo de abordar las diversidades funcionales, más allá de utilizar un elemento mecánico.



## Introduction: On adaptive assistance

“  
 –Why would you do this?  
 –Because the needs of the one... outweigh the needs of the many.  
 Star Trek III: The Search for Spock”

### 1. Disability and Assistive Devices

Population in developed countries has been aging steadily during the last decades. There are already 629 million people aged 60 years or older, growing into almost 2 billion by 2050, well over the population of children (0-14 years) for the first time in human history [1]. This trend is stronger in Europe: 65 year old people will become 30% of the total population [2] by 2050. One of the side-effects of this longer life cycle is an increasing number of people affected by chronic diseases -such as heart disease, cancer and mental disorders- that may lead to disability. Nowadays there are already around 45 million people affected by disability only in Europe [3]. *Disability* leads to major social and personal costs, but also implies an enormous economical burden.

When the capacity of a person to cope with his/her *Activities of Daily Living* is affected, they become dependent. Under these circumstances, they either require help at home or need to be institutionalized in nursing facilities. The rise in health care is estimated to be between 1.3 trillion to over 4 trillion dollars [4]. Indeed, costs associated to assistive services are already up to a 5% of the European *Gross Domestic Product (GDP)* and they are expected to grow to a 20% of the *GDP* in 2025. Avoiding institucionalization is not only a matter of reducing costs, it improves elder's health and quality of life [5]. It has been reported that *Asistive Devices (ADs)* may help people to remain autonomous [6-8]. In fact, the majority of older adults with disabilities use an *AD*, most often for mobility [9,10]. Some studies state that, on average, physical challenge in the home environment is inversely associated with level of *AD* use [11], while others point out that mastering of mobility assistive device skills enhances a person's autonomy and participation in *Activities of Daily Living* [12].

Unfortunately, not every person affected by disability can benefit from *AD*. According to clinical studies [13], about a 18% of people with motor disability find it difficult to steer and maneuver even a power wheelchair. To cope with these numbers, smart wheelchairs have been

proposed. Some studies state that 61 to 91 % of wheelchairs users could indeed benefit from the use of intelligent functionalities [14].

Smart wheelchairs are robotic devices and typically include a power wheelchair structure combined with a set of on-board sensors and processing units, plus a *Human/Computer Interface (HCI)*. However, a smart wheelchair differs from a conventional robot in a very important aspect: it is expected to detect and follow the user's intent as much as possible. If a smart wheelchair imposes its own command on its driver, it may cause him/her stress and discomfort. Consequently, smart wheelchairs typically rely on the so called *Collaborative Control* paradigm [15–18], where both user and machine contribute to control. Depending on how much autonomy the machine has, collaborative approaches can be roughly categorized into I) safeguarded operation; and II) shared control. In the first case mobiles can be totally controlled by humans, but in some cases the robot makes some decisions when human control is not adequate [19–21]. In the second case, control may be handled from user to machine depending on the situation at hand. Some of these approaches [15, 17, 22–25] rely on using a basic set of primitives like *AvoidObstacle*, *FollowWall* and *PassDoorway* to assist the person in difficult maneuvers, either by manual selection or automatic triggering. In other cases, a subsumption like scheme [26] is used, where detected events trigger one or several behaviours which are merged into an emergent one that is finally executed. *Mobile Aid for Elderly and Disabled people (MAID)* [7], *NavChair* [23], *TinMan* [24], *Smartchair* [25], *Wheesley* [27], *Vehicule Autonome pour Handicapes Moteurs (VAHM)* [28] follow this approach for assisted navigation. The main difference among them is how behaviours are implemented. In extreme, the driver might only point the target and the smart wheelchair would be in charge of motion planning and path tracking on its own [28–34]. These systems work like a conventional autonomous robot: the user simply provides a destination and the mobile is totally in charge of getting there via a conventional control scheme.

It can be observed that in most referred work user and robot do not contribute to control simultaneously, but rather swap it from one to the other in a prearranged way. Control swapping is not desirable because: I) control discontinuities usually provoke some discomfort; and II) people either perform a maneuver or not, i.e. they never get to practice whatever they find harder to do. Some works [35] use a purely reactive approach to achieve this level of cooperation by combining user and robot's commands, weighted by their respective local efficiency, into a single emergent one. In these cases, the user receives assistance on a need basis, but there is no planning involved, meaning that there is no prediction or medium term planning.

A pressing issue in shared control resides in how much help is given to the user, when and how. Clinicians have reported that an excess of help leads not only to frustration, but also to loss of residual skills. On the other hand, a lack of help may lead to inability to perform *Activities of Daily Living*. It is hard to predict when and how to provide assistance, since the impact of disability on each person is different and changes in time. In order to adapt assistance as best as possible to a potential user, it is important to obtain functional user profiles in tasks like wheelchair navigation.

## 2. Profiling and modulation

Disability is technically defined as a lack of ability relative to a personal or group standard or norm. It may involve physical, sensory, cognitive or intellectual impairment, mental disorder and/or various types of chronic disease. Operatively we can define *Functional disability (FD)* as the result of the interaction of different individual components of compromised functions, which is more than the simple addition of the single impairments, affecting the inpatient's global function and his self-dependency [36]. In order to simplify, we can define *Disability* as the degree



of difficulty or inability to perform basic *Activities of Daily Livings* [37,38] without assistance. Disability is not an attribute that is clearly present or absent, but rather a matter of degree.

Task metrics measure disability in terms of the user's wheelchair driving performance. They can be as simple as *Task Success* or *Task Completion Time* -where *task* is reaching an specific goal-. Navigation can be evaluated using more complex task metrics such as *Number of Collisions* or *Distance Travelled* [39] [40]. Another typical task metric is *deviation with respect to a canon trajectory*, previously drawn on the floor [41]. Dynamic environments require different task metrics: *Time* ( $T_s$ ) and *Distance* ( $D_s$ ) to stop without collisions or between collisions ( $T_c$  and  $D_c$ ) [39]. Psych metrics also measure navigation skills, but focusing on the user's mental state. They provide information about the mental effort and workload while performing driving tasks (e.g. *Joystick Variation* or *Intervention Level* during courses [42]). Apart from the workload information, psych metrics provide information about how relevant this workload is (e.g. *Disagreement* and *Inconsistency*).

These metrics are very specific, and avoid us from getting broader information about users. One of the best ways to obtain global information about patient's needs is represented by the multi-dimensional approach. In particular, in case of elderly patients the most common approach is the *Comprehensive Geriatric Assessment (CGA)*. The *CGA* is a multidimensional process designed to assess an elderly person's functional ability, physical health, cognitive and mental health, and socio-environmental situation. The multidimensional process differs from a standard medical evaluation by:

- including non-medical domains,
- emphasizing functional ability and quality of life, and
- relying on interdisciplinary teams.

All this information is gathered by the *MultiDimensional Evaluation (MDE)*, based on a set of standardized evaluation scales largely accepted and used by international teams for clinical, care, and research purposes. It includes different disability scales to evaluate the cognitive and physical state and condition of individuals. There are several clinician scales related to the degree of disability of a person. The multidimensional process differs from a standard medical evaluation by including non-medical domains, by emphasizing functional ability and quality of life, and by relying on interdisciplinary teams. All these information is gathered by the *MDE*, which involves several different disability scales. The most frequently used ones are the *Mini-Mental State Examination (MMSE)* or Folstein test [43], the *Geriatric Depression Scale (GDS)* [44] and the Barthel Index [45].

These scales are typically used in combination to obtain information about the degree of disability of the evaluated patient, e.g. Barthel and *MMSE*. Although they are useful to acquire a general idea about the potential needs of a given person -in terms of '*needs a lot of assistance*' or '*needs just a little push*'- they present several drawbacks such as a long and complex evaluation process or the lack of degree in describing specific skills. Hence, if a skill is partially affected, the person is deemed unable to perform related actions, e.g. a person unable to steer left could be labelled as non-apt for corridor navigation, even though he would actually need no help at all to steer right.

It has been reported that subjective ratings may come closest to tapping the essence of mental workload and provide the most generally valid, sensitive and practically useful indicator [46]. One of the best known generic ones is NASA *Task Load Index (TLX)* [46], consisting on several component scales. However, there are more specific questionnaires for assistive technologies, including: *Psychosocial Impact of Assistive Devices Scale (PIADS)*<sup>1</sup> [47] [48], *The Matching*

---

<sup>1</sup><http://www.piads.ca/>

*Person and Technology (MPT)*<sup>2</sup> [49], *Functioning everyday with a wheelchair (FEW)*<sup>3</sup> [50] or *Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology (QUEST)* [51].

These questionnaires are useful to evaluate how people cope with assistive technology from their own point of view. However, they lack of information on the nuclear set of skills required for *Activities of Daily Living* and affected by disability. There are many approaches to cope with this problem, but most of them are related to the so called obstacle courses. These approaches rely on building an artificial environment representing as many potential challenges to a wheelchair driver as possible. Users are evaluated there performing a set of tasks. The most common outcome measures are *task performance time*, *physical strain*, *independence in performance* (from other assistive devices or persons), *distance covered in propulsion* and *endurance* [52–55]. The main drawback of profiles built with this methodology is that they require specific installations and supervision each time performance needs to be measured and, hence, are not adequate for persons in constant evolution.

If we consider the drawbacks of all these evaluation methods, we can actually decide on the features of the profiling tool we would need to provide adaptive assistance on a need basis:

- Profiles need to be functional, i.e. clearly state what the person can or can not do and how proficient he/she is (in our case, with respect to wheelchair navigation)
- Profiles need to be constructed on the fly and, if possible, in a transparent fashion with respect to the user
- Profiles need to automatically evolve in time

One of the goals of these thesis is, consequently, to obtain a profile that meets all above criteria. Once such profile is available, a robot can reliably decide when to provide assistance and how much help is required. Next section focuses on how this profile can be combined with navigation control techniques. However, profiling tools will be analysed in deeper detail in chapter 2.

### 3. Motion planning and space representation

Motion control algorithms in robots usually fall into three loose categories: *Sense-Plan-Act (SPA)*, reactive and hybrid paradigms. Originally, all systems relied in the *SPA* paradigm, also known as deliberative control [56]. *SPA* schemes are often criticized for their inability to react rapidly and their strong dependence on a (reliable) model of the environment [57]. Hence, they are not advisable for dynamic environments, and much less when (usually unpredictable) humans do contribute to overall motion.

Reactive methods try to solve this problem by directly coupling sensors and actuators to conform a simple behavior [58]. These behaviors are combined into an emergent, more complex one to active the desired goal. While reactive behaviors are simple, flexible and robust against noise, they also tend to be unpredictable, sometimes non-efficient and prone to fall into local traps. Consequently, most systems nowadays combine both a reactive and a deliberative module into a so called hybrid system, usually following a three layers scheme [59].

As commented in section 1, wheelchair navigation usually follows the shared control paradigm. When control is swapped from human to robot, the robot control algorithm may be *SPA*, reactive or hybrid. Thus far, systems where user and robot contribute simultaneously to control are reactive, as commented. Hence, they are affected by most of the problems associated to reactive

<sup>2</sup><http://members.aol.com/IMPT97/MPT.html>

<sup>3</sup><http://www.few.pitt.edu/>

control <sup>4</sup>. Besides, adaptation to the user is reactively handled: instead of using a user profile to decide how much control he/she exerts, only local efficiency factors are taken into account. There have been some attempts to modulate user control through user's features, mainly clinical scales or biometrical readings [60], but this modulation does not really take into account the user's residual skills, but rather his state or global condition.

In order to improve existing approaches, this thesis will incorporate the proposed user profile into low level reactive shared control, so that user and robot do contribute to control simultaneously, but also that the amount of help is as adapted to the user's specific skills as much as possible. Depending on how well the user copes with the maneuver at hand according to his/her functional profile, the amount of assistance in the area will be modulated to increase or decrease accordingly.

However, purely reactive approaches still yield an additional problem: lack of planning. Sometimes it might be better to avoid areas that could be problematic for the user than to increase the provided amount of help. In order to decide the better routes for each specific user, an adapted model of the environment and a personalized planning algorithm are required. Hybridization of the proposed reactive scheme and such a planner will conform the full adaptive control architecture proposed in this thesis.

The key idea under this proposal is that assisted wheelchair navigation is a heavily grounded problem: the user profile affects everything, from the reactive layer of the system to the environment model used for planning. There are many well known approaches to include a mobile constraints into planning, like the *Dynamic Window Approach (DWA)* [61]. *DWA* consists of two main components: I) generating a valid search space; and II) selecting an optimal solution in the search space. *DWA* and similar approaches, however, usually cope with the mobile dynamics rather than with the user's driving skills. Mobile dynamics are more stable and easier to model.

Other approaches focus on motion planning in continuous parametric spaces with discrete search over skill choices [62]. These approaches mostly focus on humanoids. These methods include motion planning in continuous parametric spaces with discrete search over skill choices (e.g. [63]) -mostly adequate to determine a sequence of actions to be taken- and continuous search (e.g. [64]) -more adequate to search the continuous configuration space of an extremity-.

Given an initial state  $\bar{x}_i$  and a final set of goal states  $\bar{x}_g$ , the goal of a skill planner is to produce a sequence of  $n$  skills, together with their application parameters such that, after the sequential application of all the skills, the mobile moves from  $\bar{x}_i$  to  $\bar{x}_g$  only traversing states with configurations in the subspace of collision free (and balanced) configurations  $Q$ . As commented, this approach is mostly applied to humanoid robots, but the general idea of skill-sequencing is also adequate for our goals as we have built a skill based navigation functional profile.

However, skills in wheelchair navigation for a person with disabilities are heavily linked to the environment, so they need to be linked to whatever environment model we are using. Although there are approaches to smart environments in the field of assistive wheelchair navigation [65,66], most interaction with the environment is centered on mesh networks for mobile localization and detection, i.e. they are wheelchair-centered rather than user-centered, or on service providing, not strictly related to navigation itself.

In our case, we propose to embed each user profile into the wheelchair model of the environment, so that navigation is personalized for each specific person. In this sense, our proposal follows the classic all terrain navigation schema, where the difficulty of traversing each area is already present in the map [67,68].

---

<sup>4</sup>These reactive shared control systems are not affected by local traps, because humans always add an extra component to control that moves the system out of them.

## 4. Document structure

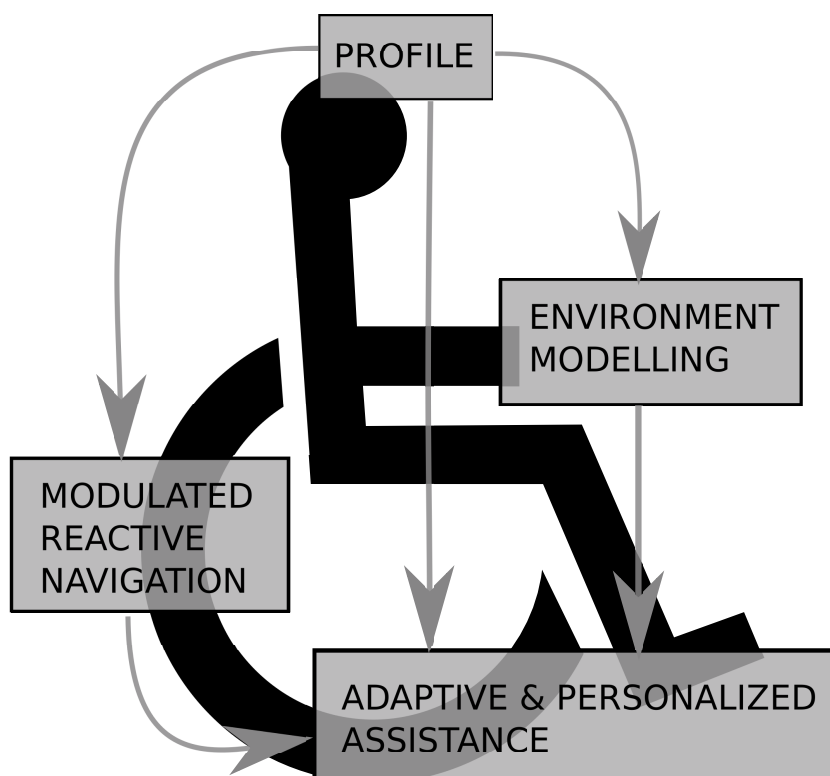


Figura 1.1: From profiling to adaptive assistance

The goal of this thesis is to provide a full user centered adaptive hybrid control architecture for assistive wheelchair navigation. The main novelty of this work is full adaptation of the whole navigation process to the user via learning. Personalization in this case is extremely important because our target population includes people with physical and cognitive disabilities and it is necessary to provide just the right amount of assistance to: I) avoid frustration and stress; II) prevent loss of residual skills; and III) enable *Activities of Daily Living*.

Figure 1.1 depicts the workflow from profiling to adaptive assistance. This document covers all required stages to achieve the full architecture and it is structured as follows:

- Chapter 2 focuses on user profiling. It includes a review of existing tools and outlines the need for a skill-based functional profile to estimate the effort of a task for a specific user. Then, it proposes a methodology to extract a navigation profile from data gathered from a large number of volunteers presenting different degrees of physical/cognitive disability in real wheelchair navigation tests. This methodology is used for two different purposes. First, we obtain the so-called standard user profile, extracted from the average performance of our population, for benchmarking and reference. This profile presents the unique set of skills required for indoor navigation, plus the efficiency of an average user for each of those skills. Then, we can extract a skill based navigation profile for each user on the fly, by checking which skills he/she lacks or presents with a low relative efficiency. This profile will be user in later chapters to adapt assistance on a need basis to the user.

- Chapter 3 presents the deliberative layer of the proposed architecture. The main novelty of this layer is that we embed the user profile into the model of the environment. Hence, plans are heavily adapted to the user condition and skills. The model of the environment is a hierarchical multilevel representation that combines a linked geometric and topological level for fast updating and processing. This chapter also includes integration of the deliberative and reactive layers of the architecture for plan-based action.
- In order to provide assistance to the wheelchair user, we have build a hybrid control architecture following a bottom-up approach. The key idea underlying this paradigm is that we add new functionalities to a basic set in a hierarchical way. The reactive layer of the proposed architecture is presented in chapter 4. It is based on the shared control reactive architecture proposed in [69]. However, we use the profile presented in chapter 2 to personalize assistance to the user via modulation.
- Chapter 5 presents tests and experiments of the proposed architecture. All tests are performed using a learning based emulation algorithm fed with data from real persons with different disability profiles driving a power wheelchair in indoor environments. Thus, we can extensively test the proposed system in extreme conditions.
- Finally, conclusions and future work are presented in chapter 6.



## Perfilado y evaluación de usuarios

“  
—In 900 years of time and space, I've never met anyone who wasn't important.  
”  
*Doctor Who, A Christmas Carol*

### 1. Población objetivo

El paso previo a la personalización de la asistencia consiste en identificar las necesidades y capacidades de nuestra población objetivo. Este capítulo describirá en primer lugar a esta población. Se presentarán los mecanismos clásicos de evaluación médica de la diversidad funcional y sus limitaciones. Es por ello que posteriormente obtendremos un conjunto de capacidades funcionales necesarias para la navegación, que **nos permita identificar y cuantificar las necesidades concretas de cada usuario.**

Independientemente de otros factores relevantes, esta población posee dos características fundamentales:

- una limitación funcional media: la tercera edad y las personas con diversidad funcional conforman un grupo con una gran dispersión y heterogeneidad de perfiles funcionales. Las dolencias más habituales en estos grupos (ictus cerebral, Parkinson, Alzheimer) pueden provocar limitaciones funcionales desde leves a muy severas. Las consecuencias van desde tener la posibilidad de caminar con un bastón o sufrir leves pérdidas de memoria hasta estar completamente enclaustrados en una cama o ser incapaces de entender un concepto simple. El rango inferior entra dentro del campo de la prevención y alberga la posibilidad de una vida independiente. El otro se encuentra forzosamente en el marco de los cuidados paliativos dentro de una institucionalización. Por lo tanto, la tecnología asistiva estará enfocada a personas con limitaciones funcionales medias o leves, potencialmente más beneficiadas por una intervención asistiva.
- un perfil funcional variable: el nivel funcional asociado a una discapacidad moderada puede mejorarse gracias a una adecuada intervención asistiva o rehabilitadora. Los usuarios de un dispositivo asistivo pueden beneficiarse de su adaptación, y mejorar su condición como resultado del tratamiento de rehabilitación. Por otra parte el dispositivo asistivo puede prevenir el deterioro de su autonomía por el progreso de su enfermedad.

Una población definida por estas características es representativa no solo de la mayoría de personas mayores o con diversidad funcional, sino de un amplio rango de población potencialmente beneficiaria del uso de un dispositivo asistivo altamente adaptativo.

La presencia simultánea de limitaciones cognitivas y de movilidad tiene un efecto multiplicador. La limitación funcional resultante es peor que la esperada de sumar las dos condiciones independientes. Una posible clasificación incremental de limitaciones motrices según su relación con problemas cognitivos podría ser:

- problemas de movilidad debidos a un trauma físico (rotura de cadera, lesión medular ...),
- problemas de movilidad debidos a un daño cerebral que afecta a la ejecución motora (ictus cerebral con *Aparaxia*, *Agnosia* o *negligencia unilateral*),
- problemas de movilidad debidos a un daño cerebral que afecta a la ejecución motora, afecta a la capacidad de atención y altera la capacidad de realizar tareas (demencia).

Una buena interacción entre usuario y dispositivo asistivo es por lo tanto vital para obtener los mejores resultados en términos de independencia. Su efecto es tanto mayor cuanto más temprana sea la interacción. Los resultados en rehabilitación dependen no solo de los métodos, sino también de la temporización: los individuos deben comenzar a usar sus dispositivos asistivos en una situación *post-aguda*, referida al suceso que modifico su estado funcional previo.

Es más, los usuarios tienen más posibilidades de aprender a utilizar los dispositivos para cubrir sus necesidades en esta situación. Por lo tanto los pacientes en situaciones post-agudas han de ser seleccionados preferentemente, específicamente donde reciben rehabilitación.

## 2. Mecanismos de Evaluación

A efectos de adaptar la ayuda cada usuario es necesario evaluar sus capacidades. No existe un mecanismo de evaluación estándar en el campo de la navegación robótica. Tampoco existe forma establecida de medir el rendimiento de una silla de ruedas, máxime bajo un sistema de control complejo. Sin embargo, existen una buena cantidad de propuestas que coinciden en los parámetros de interés para la navegación asistiva (p.e. [70]).

La navegación asistiva de sillas de ruedas es un campo donde convergen muchos otros, desde ciencias cognitivas como la medicina hasta ingenierías. De ahí la dificultad de encontrar una métrica que aúne todos los aspectos.

Es posible definir dos grandes conjuntos de métricas, en base al enfoque común que toman: I) enfocadas al estudio de la condición, II) enfocadas al estudio de las capacidades.

El estudio de la condición trata de describir de un modo global el estado y grado de dependencia que presenta un usuario. Se basan en la premisa de que el rendimiento dependerá del estado del usuario. Sin embargo, el grado de dependencia es un parámetro difícil de evaluar de forma objetiva y de modo continuo. Utilizan detallados cuestionarios para medir el grado de dependencia de una persona. Las métricas enfocadas al estudio de capacidades evalúan, más o menos directamente, la destreza en el manejo de sillas de ruedas, sin tener en cuenta el estado del paciente. Son, por lo general, más simples y rápidas de evaluar, pero carecen de la perspectiva global de las primeras.

### 2.1. Métricas de condición

El origen de la dependencia es muy diverso, pero sus consecuencias son similares. En consecuencia, los procedimientos para evaluar el grado de dependencia se orientan a medir las



aptitudes más que las causas de las mismas. Presentaremos, en orden de especificidad, algunos de los índices y cuestionarios más habituales en la práctica médica, que nos permiten obtener una valoración práctica del estado del paciente. Un compendio más exhaustivo de las diferentes escalas puede hallarse en [71].

## Clasificación Internacional del Funcionamiento de la discapacidad y de la Salud

Esta clasificación fue publicada por la *Organización Mundial de las Salud (OMS)* en el 2001 para estandarizar las descripciones de salud y discapacidad [72]. Proporciona un marco conceptual para la descripción de la funcionalidad y discapacidad. Además es una herramienta para describir los elementos de información necesarios relativos a personas con discapacidades.

La estandarización del lenguaje ofrecida por la *Clasificación Internacional del Funcionamiento de la discapacidad y de la salud (CIF)* permite la descripción de los casos de discapacidad, la estandarización de los sistemas de historial médico y la comparación de estadísticas entre países. La *OMS* proporciona el *CIF* junto con unos calificadores, permitiendo extrapolar otras escalas de salud existentes al *CIF*. También ofrece la posibilidad de desarrollar escalas a partir de los códigos *CIF*<sup>1</sup>.

El *CIF* consta de cuatro dominios: estructuras corporales, funciones corporales, factores ambientales y actividades y participación. Existen tres conceptos centrales en *CIF*:

- **Discapacidad:** impedimento, disfunción o pérdida de funciones/estructuras del cuerpo.
- **Limitación:** dificultad de un individuo para ejecutar una actividad particular.
- **Restricción:** problemas experimentados por un individuo en el desarrollo de actividades cotidianas.

Cada dominio tiene una estructura jerárquica con códigos numéricos. El código es mayor cuanto más específica sea la función o actividad. Este sistema permite la descripción de una discapacidad de forma programática. Por ejemplo, en el dominio de actividades y participación, capítulo de cuidado propio, el aseo propio tiene el calificador *d510*. Una discapacidad leve se describiría con el código *d510.1*.

Actualmente el ICF dispone de 1424 códigos. Hay que definir subconjuntos de códigos para un determinado propósito, denominados *ICF checklist*. Estos permiten describir y hacer un seguimiento de la discapacidad y estado funcional de un paciente [73]. Otra de las actividades centradas en el ICF es el desarrollo de métricas estándar para las enfermedades crónicas, mediante los *ICF core-sets*.

## Escala de Lawton de actividades instrumentales de la vida diaria

La escala de Lawton de *Actividades Instrumentales de la Vida Diaria (AIVD)* fue desarrollada por Lawton y Brody en 1969 para evaluar las *Actividades de la Vida Diaria (AVD)* más complejas necesarias para una vida independiente. La capacidad para una *AIVD* se pierde antes que la de una *AVD*, por lo que la evaluación de las *AIVD* puede predecir un declive físico o cognitivo incipientes en un adulto aparentemente saludable y capaz.

La escala Lawton es un cuestionario de ocho apartados, con una puntuación final de entre 0 (baja independencia) y 8 (alta independencia). Los apartados de la escala de Lawton son:

- Capacidad para usar el teléfono.
- Hacer compras.

<sup>1</sup>Pueden consultarse *on-line* en <http://apps.who.int/classifications/icfbrowser/Default.aspx>

- Preparación de la comida.
- Cuidado de la casa.
- Lavado de la ropa.
- Uso de medios de transporte.
- Responsabilidad respecto a su medicación.
- Manejo de sus asuntos económicos.

En cada apartado, se escoge la respuesta que mejor describe la situación del paciente y su puntuación asociada (0 ó 1). Las respuestas de los ocho apartados variarán en función del nivel de competencia - desde total independencia realizando la actividad hasta no poder realizarla en absoluto-. Todas las habilidades medidas por la escala están basadas principalmente en una función cognitiva o física, pero todas requieren cierta competencia en ambas.

Esta escala es más útil para las personas que todavía residen en sus hogares ya. Y es que muchas de las *AIVD* se realizan con ayuda de cuidadores en hogares tutelados o residencias. Por otro lado, esta escala es más útil en mujeres, ya que muchos varones nunca han realizado algunas de las actividades que se evalúan.

### Modified Cumulative Illness Rating Scale (CIRS)

La *Escala de Puntuación Acumulativa de Enfermedad (Cumulative Illness Rating Scale) (CIRS)* es una herramienta para la medida de la comorbilidad. Mide la carga de la condición médica crónica teniendo en cuenta la severidad de las dolencias crónicas.

Puntuación	Severidad	Descripción
1	Nula	Sin disfunción en el órgano/sistema
2	Leve	La disfunción no interfiere con su actividad normal; puede no requerir tratamiento; pronóstico excelente (ejemplos: lesiones de la piel, hernias, hemorroides)
3	Moderada	Disfunción con interferencia en la actividad diaria; requiere tratamiento; pronóstico bueno (ejemplos: cálculos biliares, diabetes, fracturas)
4	Severa	Disfunción incapacitante; requiere tratamiento inmediato; pronóstico moderado (ejemplos: carcinoma, enfisema, insuficiencia cardíaca congestiva)
5	Extrema	Disfunción con riesgo; requiere tratamiento urgente; pronóstico grave (ejemplos: infarto de miocardio, embolia, sangrado gastrointestinal, ictus cerebral)

Tabla 2.1: Valoración CIRS de un sistema

Fue posteriormente revisada para reflejar los problemas comunes de la tercera edad, renombrándose como *Escala de Puntuación Acumulativa de Enfermedad en Geriatría (Cumulative Illness Rating Scale for Geriatrics) (CIRS-G)*. Más recientemente, esta última versión ha demostrado ser un indicador correlado con la capacidad de rehabilitación, el tiempo de hospitalización, uso de medicamentos y la mortalidad a 24 meses, cuando incluye condiciones

agudas [74–76]. El *CIRS* contempla 14 categorías correspondientes a un sistema (renal, cardíaco, respiratorio ...). Cada categoría se puntúa según la valoración de la Tabla 2.1.

### The Geriatric Depression Scale (GDS)

La *GDS*<sup>2</sup> es un test de autoevaluación de treinta preguntas diseñado específicamente para identificar depresión en la tercera edad, desarrollado en 1982 por J. A. Yesavage, et al. Utiliza respuestas de tipo si/no, más sencillas que las respuestas escaladas. Las respuestas tienen una puntuación de 1 ó 0 según indiquen depresión o no.

Una suma de diez o menos es el umbral para discriminar pacientes con depresión. Aunque el test tiene una validez y fiabilidad bien establecidas, el diagnóstico clínico de la depresión no debe basarse únicamente en los resultados del *GDS*. Las respuestas deben ser consideradas en conjunción con otros resultados procedentes de estudios diagnósticos más comprehensivos, Este test es habitualmente un elemento recomendado para la evaluación geriátrica rutinaria.

Existe una versión corta del *GDS* con tan solo 15 preguntas. Además está disponible en una gran cantidad de idiomas.

### El índice de Barthel

El índice *Barthel*<sup>3</sup> para las *AVD* debe usarse como un registro de las actividades reales del usuario y no de las potenciales. Su objetivo es establecer el grado de independencia de cualquier tipo de ayuda, verbal o física, sin importar grado o motivo.

La necesidad de supervisión describe el grado de dependencia de un paciente. El rendimiento de un paciente debe ser establecido utilizando la mejor evidencia disponible. Las fuentes habituales son las entrevistas con el paciente, amigos, parientes y enfermeros, aunque sin detrimento de la observación directa y el sentido común. No es necesario probar directamente las actividades. Lo habitual es dar más importancia al rendimiento del paciente en una ventana de 1 o 2 días, aunque intervalos mayores pueden ser relevantes. Esta escala permite el uso de ayudas para mantener la independencia.

### Mini-mental state examination (MMSE)

Resultado	30-25	24-21	20-10	<10
Discapacidad cognitiva	ninguna	leve	moderada	severa

Tabla 2.2: Valoración del test MMSE

El *MMSE*<sup>4</sup> o test de Folstein es un cuestionario de diez minutos y 30 puntos utilizado para visualizar las funciones cognitivas. La Tabla 2.2 muestra la correspondencia entre el resultado del test *MMSE* y el grado de discapacidad cognitiva. No es apto para realizar diagnosis, pero puede indicar presencia de una discapacidad cognitiva en un momento dado y seguir el curso de los

<sup>2</sup><http://www.stanford.edu/~yesavage/GDS.html>

<sup>3</sup> Nota de Copyright: La propiedad intelectual del índice de Barthel pertenece a la sociedad médica del estado de Maryland. Puede ser utilizado libremente sin ánimo de lucro con la siguiente cita: *Mahoney FI, Barthel D. "Functional evaluation: the Barthel Index." Maryland State Med Journal 1965;14:56-61. Used with permission. Permission is required to modify the Barthel Index or to use it for commercial purposes.*

<sup>4</sup>Introducido por Folstein et al. en 1975, es copyright de la *Psychological Assessment Resources (PAR)*. El permiso para incluir o reproducir todo el test o la escala en cualquier publicación o página web está restringido.

cambios cognitivos en un individuo en el tiempo. Es decir, es un método efectivo de documentar la respuesta de un individuo al tratamiento.

El *MMSE* es más preciso en la detección de discapacidades cognitivas que los cuestionarios informales o la impresión global sobre la orientación del paciente. Muestra diversas funciones cognitivas tales como la aritmética, orientación, memoria inmediata, memoria a corto plazo y el lenguaje.

Es importante hacer que el paciente se sienta cómodo y establecer una buena comprensión antes de realizar el test *MMSE*. Alabar los éxitos ayuda a mantener esta sintonía y es aceptable. Por el mismo motivo se debe evitar insistir en los elementos más difíciles para el paciente.

El origen cultural, la educación o la inteligencia influyen en el resultado del test. Una persona con un alto nivel cultural podría obtener un buen resultado incluso padeciendo una discapacidad cognitiva mientras que otra con una menor educación pero sin discapacidad no puntuase especialmente alto. Si el paciente tiene limitaciones en sus capacidades de aprendizaje, lingüística, comunicación o sensoriales, el *MMSE* puede no ser una herramienta de evaluación adecuada.

## Usabilidad

Algunos estudios indican que las escalas subjetivas son más afines al proceso del esfuerzo cognitivo y por tanto, proporcionan indicadores más válidos y prácticos. Es por tanto que se han desarrollado cuestionarios para puntuar el grado de actividad del usuario desde un punto de vista cualitativo. Los profesionales médicos han desarrollado sus propias escalas clínicas [77] a tal fin. Lamentablemente, su falta de estandarización limita la replicabilidad de los experimentos. Pero en general, existen algunos cuestionarios de amplia difusión, cuyo uso es ampliamente aceptado [78].

Existen cuestionarios específicos para sistemas asistivos. Uno de los más conocidos es el *PIADS* [48] [47], de uso libre en la práctica clínica, investigación y educación. Es un test rápido - su realización lleva de 5 a 10 minutos -. Contiene 26 categorías puntuables entre [-3,3] que incluyen preguntas sobre cuestiones tales como la autoestima, bienestar, calidad de vida, timidez o disposición a probar nuevas experiencias. El *PIADS*<sup>5</sup> mide la percepción de cómo los dispositivos asistivos afectan a la calidad de vida personal. *PIADS* describe las experiencias del usuario en tres vertientes: competencia, adaptabilidad y autoestima. Cada palabra o frase en el cuestionario describe cómo usar un dispositivo asistivo puede afectar al usuario. Algunas cuestiones pueden parecer inusuales pero es importante responder cada una para describir la percepción del usuario.

El *MPT* [49] también es una herramienta muy utilizada para evaluar cómo el usuario percibe las tecnologías asistivas. En primer lugar se evalúa el estado del paciente en lo referente a vista, oído, movilidad, capacidades de comunicación. Así mismo, evalúa *AVD* tales como escritura, lectura, tareas domésticas, etcétera. También incluye una sección para aprendizaje y capacidades cognitivas. Todos esos factores son evaluados en referencia a las tecnologías ya utilizadas, en uso y a las tecnologías requeridas. Tras evaluar la competencia, el *MPT* pasa a la opinión de la persona con respecto a la tecnología, su experiencia, su frecuencia de uso ... Estas opiniones se evalúan como positivas, indiferentes o negativas. Además, existe una parte del cuestionario reservada no para el usuario, sino para el supervisor del proceso.

El *FEW* [50]<sup>6</sup> es un indicador dinámico o perfil del uso percibido por el usuario en lo referente a sillas de ruedas. Fue desarrollado por un equipo de investigadores clínicos de la Universidad de Pittsburgh, debido a la falta de disponibilidad de métricas de resultados específicas para el uso de sillas de ruedas. El *FEW* está mayormente relacionado con las características de tamaño, ajuste y soporte postural y funcional de las sillas de ruedas (o *scooters*). Utiliza diez sentencias

<sup>5</sup><http://www.brunel.ac.uk/bib/tact3/workpackages/canadian-link-project-piads>

<sup>6</sup><http://www.few.pitt.edu/>

que el usuario debe puntuar con 6 opciones desde *totalmente de acuerdo* hasta *totalmente en desacuerdo*, más una categoría para *no aplicable*.

Otro cuestionario similar es el *QUEST* [51]. Se centra en la satisfacción del usuario con la tecnología y/o servicios asistenciales proporcionados. Presenta doce ítems puntuables desde 1 (nada satisfecho) a 5 (muy satisfecho). Los ítems contemplan desde consideraciones físicas como peso o dimensiones del dispositivo, hasta elementos como el servicio de entrega, reparación o mantenimiento. También incluye consideraciones subjetivas tales como facilidad de uso o efectividad.

Desde un punto de vista diferente, la NASA propuso el *TLX* [46] para medir el esfuerzo. El *TLX* fue desarrollado bajo la premisa de que el esfuerzo surge de la interacción entre: los requisitos de una tarea, las circunstancias bajo las que desarrolla y las habilidades, comportamientos y percepción del operador. Este planteamiento sobrepasa con mucho el centrado simplemente en la interacción con el interfaz.

El *TLX* es una métrica genérica para cualquier tipo de tarea, pero es aplicable a la navegación supervisada. Consiste en un conjunto de escalas enfocadas a un aspecto concreto. El promedio de las mismas, ponderado para reflejar la contribución de cada factor al esfuerzo de una actividad específica, es la medida integral del esfuerzo de toda la tarea. Los factores más relevantes incluyen: esfuerzo global (bajo-alto), dificultad de la tarea (bajo-alto), presión temporal (ninguna-apresurado), rendimiento (fallo-perfecto), esfuerzo mental/sensorial (ninguno-imposible), esfuerzo físico (ninguno-imposible), nivel de frustración (satisfecho-exasperado), nivel de estrés (relajado-tenso), fatiga (exhausto-alerta), tipo de actividad (basada en habilidad/basada en reglas/basada en conocimiento). Estos factores son puntuados realizando una marca en una recta de 12 cm. Posteriormente estas marcas son extrapoladas a un valor porcentual para su cómputo.

En resumen, el *TLX* está relacionado con los interfaces hombre-máquina para control compartido, mientras que el resto de cuestionarios se centran específicamente en las tecnologías asistenciales. De hecho, sólo el *FEW* se diseñó específicamente para sillas de ruedas. Sin embargo todos son aptos para su uso en este ámbito.

## 2.2. Métricas de capacidad

Las métricas de condición ofrecen mucha información del estado del paciente, pero no acerca de cómo dicha condición afecta su capacidad de maniobrar una silla de ruedas. La forma más usual de hacerlo es a través de *rutas patrón*, cuyo objetivo es determinar la capacidad de una persona de evaluar ciertas maniobras (p.e. giros abruptos, rampas ...), en función de sus habilidades físicas y cognitivas. En ausencia de este tipo de rutas patrón, existen múltiples propuestas de métricas evaluables en cualquier tipo de silla de ruedas. Se agrupan en torno a dos grupos, según su orientación: a tarea y a esfuerzo cognitivo [42]. El primer grupo se centra en el grado de éxito de diferentes tareas: obstáculos evitados, desviación de la trayectoria, ... El segundo grupo, por contra, mide parámetros relativos a la fatiga o la atención desde el punto de vista del usuario.

### Rutas patrón

Las rutas de obstáculos son uno de los tipos más comunes de métricas para evaluar la competencia con sillas de ruedas. Estas métricas están orientadas a medir la habilidad para maniobrar una silla de ruedas, utilizando situaciones controladas o emulando situaciones de *AVD*. Fliess-Douer [79] y Kilkens [55] coinciden al señalar las habilidades más utilizadas en estos tests:

- Propulsión de la silla de ruedas, evaluada en función del tiempo en recorrer una distancia fija, o de la distancia máxima recorrida en un tiempo prefijado.
- Transferencia desde y hacia la silla de ruedas, examinando el rendimiento en diferentes tipos de transferencias.
- Interacción con bordillos de diferentes alturas, requiriendo subir o bajar de ellos.
- Subida de pendientes, según su inclinación y longitud.
- Trazados predefinidos, como eslabon, trazados en forma de ocho, rutas de obstáculos.
- Maniobras complejas (p. e. caballito).
- Habilidades específicas: manejo de frenos, interacción con puertas, carga de la silla en un coche . . .

Estos autores hacen énfasis en la brevedad y simplicidad de los tests como factor relevante en su eficacia, evitando el uso de espacio o equipamientos adicionales. El Valutazione Funzionale Mielolesi (VFM) [52] o el Tufts Assessment of Motor Performance (TAMP) [53] tardan aproximadamente una hora en realizarse. Por otra parte, el Wheelchair Skills Test (WST) [54] tan solo necesita unos treinta minutos.

El parámetro más relevante obtenido con estas pruebas es el tiempo de *ejecución de tarea*. El *esfuerzo físico*, la *autonomía en la ejecución* (de otras personas o dispositivos), la *resistencia* u otras puntuaciones más subjetivas de dificultad también son utilizadas. Sin embargo se prefiere simplicidad en el sistema de puntuación en aras de un sistema práctico y fácilmente analizable. Hay que señalar que por su acotación espacio-temporal, las métricas se aplican a una ruta predefinida y no a una *AVD*.

Otro factor determinante en la elección del parámetro medido mediante rutas patrón es el objetivo del estudio. Indicadores de esfuerzo o distancia evalúan la viabilidad del uso de una silla de ruedas manual en el día a día. Mientras tanto indicadores de autonomía evalúan la independencia del usuario.

Algunos estos parámetros parecen interdependientes, dificultando la interpretación de los resultados. Por ejemplo, el estrés físico y el tiempo de ejecución: mayor a mayor tiempo de ejecución menor estrés físico. Si utilizamos varios parámetros no se puede evaluar el resultado global simplemente sumándolos. La suma de diferentes parámetros es solo razonable cuando se aplican al mismo fenómeno.

La ruta patrón puede consistir en seguir una simple línea recta en un pasillo despejado o cruzar una puerta [41] para los usuarios con un alto grado de dependencia. En estos casos, la tasa de éxito en tareas sencillas es correlable con el grado de dependencia.

Sin embargo, estas técnicas no son sencillas de evaluar. Por lo general requieren de un considerable espacio e inversión para construir los escenarios para las pruebas especificadas. Además, las habilidades se miden en condiciones controladas y reproducibles, por lo tanto muy lejos de situaciones cotidianas. Es su capacidad para establecer puntos de referencia lo que las hace muy utilizadas para la mayoría de modelos de sillas de ruedas.

### Métricas orientadas a tarea

Esta categoría incluye todas las métricas cuantitativas relacionadas con el rendimiento del usuario con una silla de ruedas. Estas métricas miden un parámetro aislado, fácil y objetivamente evaluable. Una *ruta patrón* puede descomponerse en una secuencia de tareas más simples, pudiendo evaluar diferentes métricas orientadas a tarea durante un único recorrido. La métrica

más común y simple relativa a la navegación es el *éxito de tarea*, la cuál indica que se ha alcanzado o no el objetivo definido. El éxito de tarea suele acotarse mediante un tiempo máximo para alcanzar el objetivo durante una ruta patrón. Durante la ruta, se pueden permitir ciertas colisiones consideradas como seguras, pero se computan en la evaluación del *grado de éxito*. La terna *tiempo de realización*, *número de colisiones* y *distancia recorrida* compone el conjunto de métricas orientadas a tarea más habituales [39, 42].

Una limitación de este tipo de métricas es su especificidad. Es decir, el *tiempo de realización* de la tarea *recorrer una línea recta* no es extrapolable para el caso de recorrer un pasillo evitando obstáculos. El *HCI* utilizado también es determinante en el resultado de estas métricas: por ejemplo, no es posible comparar una silla de ruedas controlado mediante un joystick con otra controlada por voz.

Un aspecto interesante de estas métricas es su evolución temporal. No es tan interesante el tiempo de realización o el número de colisiones como la variación de los mismos con el tiempo. Dicha evolución refleja cómo el usuario incrementa su habilidad mediante la práctica. La representación gráfica de esta mejora es la denominada *curva de aprendizaje*, que muestra la evolución del parámetro en sucesivos experimentos [80].

Otra métrica habitual cuando se estudian trayectorias es la *desviación respecto a la trayectoria de referencia*. Esta desviación se cuantifica en categorías como *ok*, *aceptable* y *error* [41]. Este procedimiento no es extrapolable a situaciones generales ya que la mayor parte de la gente se centra en no abandonar la línea más que en conducir adecuadamente.

Si nuestra prioridad es determinar *cómo* está conduciendo el usuario en un instante determinado, es necesario utilizar métricas instantáneas en lugar de globales. Estas métricas nos permiten obtener medidas de rendimiento puntuales [81], sin necesidad de terminar el test completo.

Los estadísticos de estos parámetros locales (media, desviación, rango . . .) proporcionan una adecuada descripción de las habilidades de conducción en general. El promediado puede hacerse a lo largo de todo el trayecto, proporcionando información global. O también podemos estudiar la evolución de dicho estadístico para obtener información acerca de un momento concreto en la trayectoria.

Sin embargo, en entornos reales, los obstáculos pueden ser desplazados, otros móviles pueden aparecer en sitios inesperados o simplemente más gente puede estar circulando. Existen cuatro métricas para los entornos dinámicos:  $T_s$ ,  $D_s$ ,  $T_c$  y  $D_c$ , que corresponden a *Tiempo* y *Distancia de parada*, cuando no se colisiona con el obstáculo y *Tiempo* y *Distancia de colisión* en el caso contrario, referidos al momento de detección del obstáculo por parte de la silla de ruedas [39]. De forma similar, otros autores [82] utilizan el parámetro *espacio libre de obstáculos*, definido como la distancia a la que un obstáculo ha sido esquivado.

### Métricas orientadas al esfuerzo cognitivo

Estas métricas están orientadas a evaluar el estado del usuario más que su rendimiento. Por lo tanto pueden ser estimadas mediante sensores biométricos [83]. Por ejemplo, métricas relacionadas con el estrés podrían incluir una combinación de *ritmo cardíaco*, *sudoración*, *ritmo respiratorio* o incluso *gestos faciales*. El principal problema con este tipo de métricas reside en el tipo de parámetros medidos. Existe una alta variabilidad entre individuos, según su género, peso, edad y condición física. Los promedios de los pacientes también son variables en el tiempo, dificultando el establecimiento de valores de referencia. La mejor acotación consiste en unos límites aceptados por los expertos en la materia [84].

La otra limitación actual de los biométricos es su invasividad. Su uso puede ser adecuado para realizar una ruta patrón, pero para el uso diario hemos de limitar su presencia en aras del



confort del usuario. Los dispositivos multiparamétricos *vestibles* son una nueva posibilidad que podría cumplir las expectativas [85], aunque permanece la necesidad de cuantificar el estado del usuario.

Mientras que las métricas orientadas a tarea estaban más ligadas al desarrollo de la tarea, las métricas orientadas a esfuerzo cognitivo están referidas habitualmente al interfaz de usuario.

Es por esto que una de las primeras métricas orientadas a esfuerzo cognitivo fue el *número de interacciones*, o número de veces que el conductor interactúa con el interfaz de usuario [39]. Cuando la interacción no es fácil de medir externamente, algunos autores utilizan en su lugar la *cantidad de información intercambiada* entre el usuario y la máquina. El parámetro fue utilizado originalmente en teleoperación de móviles para control colaborativo, donde se observó que constituyen una medida de la usabilidad del sistema.

En muchos casos, el parámetro a medir es la carga de trabajo. Este parámetro está más relacionado con el estado del paciente y la adecuación del interfaz, incluso si está correlado con varios factores adicionales. La carga de trabajo mental está definida como la interacción entre las exigencias de una tarea experimentadas por un individuo y su habilidad para sobrellevarlas. Por ejemplo, el número de situaciones de error constituye una métrica de este tipo [39]. Algunos autores [86,87] consideran que la carga de trabajo está relacionada con un parámetro muy simple: *Variación del Joystick*, definida como los cambios de posición del joystick superiores al 5%. Hay que tener en cuenta que para el caso de los usuarios operando sillas de ruedas, la variación puede ser debida a movimientos espasmódicos del joystick.

Otra métrica similar es el *Nivel de Intervención*, definido como la porción del tiempo que el usuario mueve el joystick [42]. El *Nivel de Intervención* fue ideado en primer lugar para la teleoperación de agentes móviles, de manera que mantener un valor bajo era deseable. Así, el operador sólo interviene para tomar decisiones relevantes, pudiendo estar libre para controlar otros agentes. Es decir, mientras más bajo es este parámetro, mayor la aceptación de los comandos del agente por parte del usuario [42].

Por contra, en el *control compartido*, un alto grado de intervención es deseable, por ser la actividad clave en la prevención de pérdida de habilidades residuales. Para tener en cuenta esta dualidad, el *Nivel de Intervención* puede evaluarse junto a otro índice: *Desacuerdo*. Esta métrica está relacionada con la fidelidad del vehículo a los comandos proporcionados por el usuario. El *Desacuerdo* representa el nivel de diferencia entre los comandos de usuario y de la silla de ruedas. Siempre existe alguna disparidad entre la reacción del móvil y la esperada, aunque no siempre percibida conscientemente por parte de los usuarios. Una medida de *Desacuerdo* puede ser el ángulo de diferencia entre los vectores (i. e. cero grados significaría un total acuerdo entre usuario y móvil). Un alto nivel de *Desacuerdo* estará seguramente correlado con un gran esfuerzo y frustración por parte del usuario.

Paralelamente, para personas con diversidades funcionales también es relevante la *Inconsistencia*, definida como la variación de respuestas por parte del usuario ante situaciones similares. El objetivo de este índice es comprobar si una persona tiene una intención definida o, por el contrario, tiende a ser errático en sus decisiones. Una baja *Inconsistencia* es de esperar en usuarios con buenas aptitudes cognitivas. El caso opuesto estará probablemente condicionado por trazados mayormente erráticos.

Por lo tanto, la *Inconsistencia* da información sobre las capacidades cognitivas del usuario en lo referente a la conducción. En conjunción con el *Desacuerdo*, ofrece información sobre el grado de confort del usuario conduciendo la silla de ruedas.

### 2.3. Alcance y limitación

Es evidente la gran dispersión los mecanismos de evaluación tras exponer algunos de los



más habituales. No existe un consenso único sobre la cuantización y caracterización de las discapacidades en términos de su influencia sobre la capacidad para la conducir una silla de ruedas. Las técnicas utilizadas para este fin giran en torno al uso de cuestionarios y o de medidas realizadas en circuitos específicos. En general, las escalas de valoración actuales tienen un enfoque más global, buscando evaluar aspectos como la aptitud psicomotriz o el estado anímico general. Estas aproximaciones son de amplio uso y están meticulosamente respaldadas, pero no están exentas de limitaciones. El fundamental es su frecuencia de uso. Un test minucioso requiere de un tiempo y esfuerzo considerados para la elaboración de entrevistas o exámenes. La actualización de los perfiles está por tanto limitada por un factor ajeno a la propia evolución del mismo. Es decir, su duración y exhaustividad limitan la frecuencia con que se pueden realizar controles sobre el usuario.

La validez constituye otro factor delicado en las *métricas de condición*. Ésta ha sido comprobada por un gran número de expertos. Ofrecen buenos resultados para evaluar un paciente, pero no siempre son fácilmente comparables con los de otros. Las métricas cuantitativas de capacidad permiten una comparativa entre usuarios más sencilla y directa. Pero por contra, su repetibilidad es aún más difícil, por requerir del uso de rutas predefinidas o cronometrar tiempos de ejecución en distancias fijas. No se pueden utilizar en entornos impredecibles o rutas cambiantes, puesto que requieren infraestructuras específicas. Es más, no permiten determinar con seguridad qué situaciones reales de navegación son abordables por el usuario, o en qué medida.

Nuestra propuesta está enfocada a elaborar un perfil de manera implícita, mediante la recopilación de datos de uso [88]. Esta recopilación de datos se hace de forma continua, minimizando la interferencia en la rutina del usuario. El médico obtiene información acerca de la rutina acumulada del paciente, interfiriendo mínimamente en las *AVD* del paciente. Los datos reflejarán la evolución del paciente hasta el momento más reciente en condiciones normales. El perfil de capacidad asociado a ellos recoge de forma transparente estos cambios dinámicos. Y a su vez, el perfil de capacidad del usuario permite una navegación asistiva más ajustada a su condición presente.

### 3. Patrón asistivo

Tal y como se ha mostrado, la tarea de perfilado de usuario es una labor abordable desde diferentes perspectivas globales. Un enfoque global facilita el seguimiento y estima el rendimiento promedio del usuario. Y precisamente este mismo enfoque limita la capacidad para predecir el rendimiento instantáneo durante una *AVD* concreta. Un perfil capaz de identificar el rendimiento de un usuario en cualquier *AVD* ha de poder describir en primer lugar cualquier posible *AVD*. Una *AVD* es una tarea compleja y difícil de cuantificar adecuadamente. Nuestra propuesta es descomponerlas en sucesiones de elementos simples, elementales, fáciles de identificar y cuantificar.

Desde la perspectiva de la navegación, una *AVD* puede considerarse como una sucesión de situaciones locales. Y a nivel reactivo, cualquier situación puede ser descrita mediante los sensores del agente. El conjunto de posibles situaciones o ubicaciones a nivel reactivo es más reducido que el de posibles comportamientos. De ahí que utilicemos las ubicaciones como unidad atómica.

Minguez et al. [89], definieron para la navegación robótica un conjunto sencillo de situaciones que: I) es completo, describiendo cualquier configuración posible de robot y ubicación de objetivos; y II) es exclusivo. Usando un árbol de decisión binario se obtienen las siguientes regiones:

- **Región de Alta/Baja Seguridad con objetivo en visión:** si el objetivo está en la línea de visión.

- **Región Estrecha/Ancha de Alta Seguridad:** si los obstáculos circundantes no están demasiado cerca.
- **Región de Baja Seguridad 1 y 2:** si los obstáculos están cerca a uno o ambos lados del móvil.

Estas situaciones están representadas en la Fig. 2.1. El área de baja seguridad en torno al robot está representada en amarillo, el área libre de obstáculos en verde, los obstáculos en negro y el objetivo en rojo.

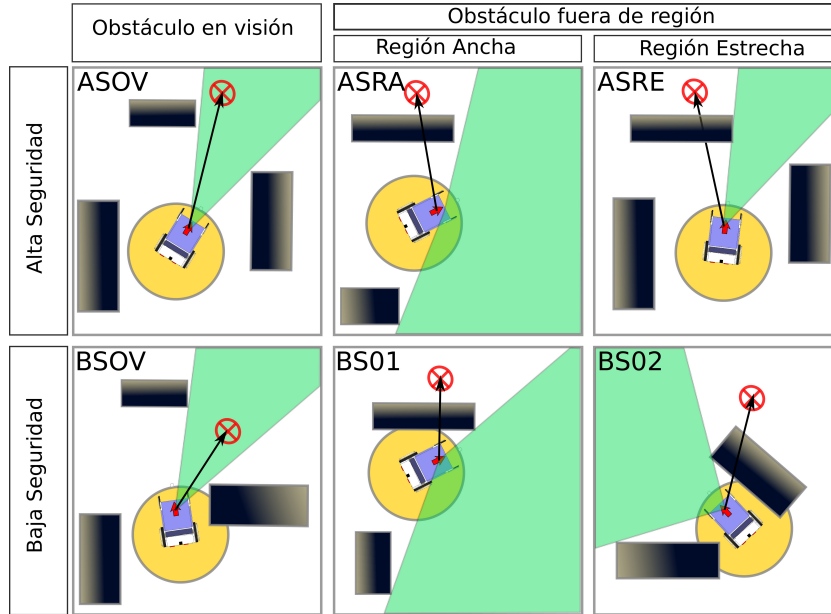


Figura 2.1: Situaciones posibles a nivel reactivo

Dado que todas las localizaciones de un entorno pertenecen a una de estas clases de regiones, un usuario puede ser descrito por su capacidad para resolver esas situaciones. Una persona capaz de resolver las seis situaciones con una eficacia razonable seguramente podrá afrontar situaciones más complejas sin más ayuda.

Una vez descompuesto el problema en sus unidades más simples y elementales, hemos de establecer qué consideramos una eficacia razonable. Se utilizaron datos de ochenta voluntarios, de los que más de setenta presentaban discapacidades físicas o cognitivas. Esos datos fueron clasificados en las seis clases ya descritas. La silla de ruedas no es un vehículo holonómico, por lo que cada clase se subdividió según la orientación relativa de la silla respecto al objetivo y obstáculos. Por ejemplo, la región de baja seguridad con objetivo en visión se dividió en 17 subclases (Tabla 2.3) para representar variantes de la misma situación en la clase. En este punto, no importa tanto la solución que el usuario escogió, sino la situación en si misma.

Cada persona se enfrentó a la misma situación muchas veces durante los experimentos, ofreciendo diferentes soluciones cada vez. Cada clase incluye un gran número de soluciones, eficaces o no. Para escoger al prototipo de la clase  $i$  -  $CP(i)$  - utilizamos la siguiente ecuación:

$$CP(i) = \sum_{j=1}^{N(i)} \frac{\eta_j c_j}{N(i)} \quad (2.1)$$

donde  $N(i)$  es el número de casos  $c$  en la clase  $i$  y  $\eta_j$  la eficiencia del caso  $c_j$ . La eficiencia es una función escalar para medir la *bonanza* de un comando. Esta evaluación se realiza en el contexto del caso, es decir a nivel local y sin ningún tipo de memoria. La función de eficiencia  $\eta$  ha sido previamente descrita en [35] y se describirá en mayor detalle en el capítulo 4.

Sin embargo, la mejor solución para una clase no puede ser calculada como el promedio de soluciones de todos sus elementos. Cada solución corresponde a diferentes usuarios utilizando estrategias diferentes para la navegación en el entorno. De ahí que respuestas diferentes sean igualmente válidas o una misma respuesta no tenga la misma eficiencia según la situación. Por lo tanto, se aplicó un tercer nivel de clasificación a cada clase. Se separaron en subclases sólo dependientes de las soluciones proporcionadas por los usuarios.

Esta clasificación se realizó dividiendo una vez más las clases en 6 subclases, según el comando de usuario. Se tomaron intervalos equiespaciados de 30 grados: extrema izquierda, izquierda, centro izquierda, centro derecha, derecha y extrema derecha. Tras la clasificación, los representantes de cada clase se calcularon según la ecuación 2.1. Finalmente, tendremos varios *CP* para cada situación, con un valor potencialmente diferente de eficiencia. Si una situación puede ser resuelta eficazmente de varias formas (situaciones de alta seguridad) o casi todas las soluciones son poco aptas (situaciones de baja seguridad), entonces los valores de eficacia del *CP* serán similares.

Los casos más eficaces serán nuestra referencia para resolver diferentes situaciones. De forma análoga, los casos con baja eficiencia son un indicador de una discapacidad relativa a esa situación. No presenta regiones de alta seguridad anchas o estrechas por desarrollarse en interiores. Además, las personas con buenas capacidades cognitivas y físicas tienden a navegar manteniendo el objetivo en visión.

















Una representación del perfil del usuario prototipo está en la Tabla 2.3. En ella se pueden observar cada una de las subclases en que se dividen cada una de las clases originalmente propuestas por [89]. Para cada subclase, presentamos en primer lugar la situación local: obstáculos detectados por el láser en negro, objetivo como una cruz roja y la silla de ruedas como un punto rojo en el lado izquierdo. A continuación se muestra el comando de movimiento proporcionado por el *CP*. Este comando es la solución proporcionada por el mayor número de usuarios y con la mayor eficiencia posible. Estos datos también están reflejados en la tabla, junto con el porcentaje aparición de cada subclase concreta.

Este perfil de usuario prototipo se ha extraído a partir de un conjunto de personas con amplio rango de diversidades funcionales. El conjunto de casos posibles, junto con el comando para abordarlos y la eficiencia esperada, constituye un auténtico catálogo general de habilidades para la navegación. Proporciona la solución más común y efectiva para resolver las situaciones concretas. Por lo tanto, cualquier *AVD* es resoluble -desde el punto de vista de la movilidad- utilizando este perfil prototipo.



















El perfil del usuario prototipo nos ofrece una referencia con la que comparar a los usuarios individuales. Para ello, creamos el perfil de un usuario utilizando las mismas técnicas de minería de datos. Podemos obtener que ciertas clases no se dan para un usuario, indicando una carencia de una habilidad concreta. O que la eficacia de sus soluciones es baja, pero conserva esa habilidad residual con respecto al prototipo.

















Pese a su utilidad a nivel teórico, es más ilustrativo analizar una *AVD* concreta. Y es que no siempre es necesario recurrir a todas las habilidades del perfil para cada situación. El usuario prototipo mostraría en una *AVD* qué habilidades son necesarias, mediante el uso de un subconjunto de clases. Son estas habilidades necesarias las que marcan el grado de éxito de un usuario. Es decir, un usuario tendrá un mayor o menor éxito según cuales de las habilidades necesarias estén presentes en su perfil.

Una realización concreta nos aportaría además información acerca trayectorias o tiempos son















Clase ASOV								
Subclase	1	2	3	4	5	6	7	8
Situación								
Comando								
Eficiencia (%)	46	40	89	54	88	51	47	37
% de casos	3.37 %	1.84 %	1.84 %	0.61 %	1.84 %	2.76 %	2.14 %	0.61 %
n° de casos	11 #	6 #	6 #	2 #	6 #	9 #	7 #	2 #

(a) Clase Alta Seguridad/Objetivo en Visión

Clase BSOV									
Subclase	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Situación									
Comando									
Eficiencia (%)	81	99	87	36	80	51	93	81	91
% de casos	6.44 %	1.53 %	2.14 %	4.90 %	6.13 %	5.21 %	7.05 %	5.82 %	7.36 %
n° de casos	21 #	5 #	7 #	16 #	20 #	17 #	23 #	19 #	24 #

Clase BSOV (cont.)								
Subclase	10	11	12	13	14	15	16	17
Situación								
Comando								
Eficiencia (%)	88	88	83	62	62	76	48	60
% de casos	6.44 %	6.13 %	1.53 %	3.06 %	2.45 %	6.74 %	5.21 %	3.37 %
n° de casos	21 #	20 #	5 #	10 #	8 #	22 #	17 #	11 #

(b) Clase Baja Seguridad/Objetivo en Visión

Clase BS01			Clase BS02				
Subclase	1	2	1	2	3	4	5
Situación							
Comando							
Eficiencia (%)	66	66	61	72	51	63	79
% de casos	0.30 %	0.30 %	0.30 %	0.61 %	0.30 %	0.91 %	0.61 %
n° de casos	1 #	1 #	1 #	2 #	1 #	3 #	2 #

(c) Clases Baja Seguridad/Obstáculos en 1/2 flanco(s)

Tabla 2.3: Perfil de usuario prototipo

esperables por parte del usuario prototipo. Es por ello que en la siguiente sección presentaremos un mecanismo de emulación que nos permita simular a este prototipo en un escenario. La simulación de pacientes mediante el perfil nos permitirá además realizar un primer análisis del efecto de nuevas configuraciones en los pacientes sin la necesidad de requerir forzosamente pruebas de campo.

## 4. Experimentos y resultados

Para validar el modelo de perfilado propuesto se ha procedido a realizar el siguiente experimento. Se han seleccionado entre los distintos voluntarios en nuestras pruebas reales 6 individuos cuya condición física y cognitiva varía significativamente, pero capaces de completar por sí mismos un recorrido complejo (Tabla 2.4) y, a partir de sus datos reales, se ha extraído su perfil por el procedimiento propuesto, es decir, cómo responden a cada una de las situaciones que pueden presentarse en navegación de interiores con respecto a nuestro usuario tipo. A continuación, se ha procedido a emular cómo resolvería cada uno de ellos un recorrido en Casa Agevole consistente en entrar a la casa por la puerta de entrada secundaria y alcanzar la puerta de doble hoja en el salón. Esta ruta contiene tres elementos principales: giros a la izquierda, seguir un pasillo y atravesar una puerta (Fig. 2.2). Es interesante señalar que algunos de los pacientes seleccionados habían efectuado un trayecto similar, que se usó para validar que la calidad de la emulación es buena, tal como se demostró en [90]. Sin embargo, se ha recurrido a la emulación en todos los casos por homogeneidad. Adicionalmente se ha emulado cómo actuaría el paciente prototipo, como referencia de todos los casos potenciales en esta ruta.

Paciente	Patología	MMSE	Barthel
909	Hemiplejia izquierda (Ictus hemorrágico)	alto	alto
906	Hemiplejia izquierda (Ictus hemorrágico)	alto	medio
905	Tetraplejia (Síndrome Guillain-Barré)	alto	bajo
808	Ictus cerebral (Hemisferio izquierdo)	medio	alto
806	Hemiplejia izquierda (Ictus)	medio	medio
903	Hemiplejia derecha (Ictus isquémico)	bajo	bajo

Tabla 2.4: Índices de los pacientes seleccionados

Por simplicidad, se han definido unos rangos para los índices, mostrados en la Tabla 2.5. Si uno de los índices está en un rango bajo, es de esperar que su perfil sea limitado. Esto implica que el usuario carece de habilidad para realizar muchas de las maniobras que aparecen.

La Tabla 2.6 recoge los casos identificados, tanto por el prototipo como por los usuarios emulados. Puede observarse que el usuario prototipo no necesita todos los casos para resolver esta ruta, ya que no se encuentra con todas las situaciones posibles, sino con un conjunto limitado de éstas. Para poder resolver el camino de forma normal, un usuario cualquiera debería disponer de todas las habilidades de este conjunto con un nivel de eficiencia similar al del usuario prototipo.

Valor cualitativo	MMSE	Barthel
Bajo	menos de 24	menos de 40
Medio	20 a 27	40-60
Alto	27 o más	60 o más

Tabla 2.5: Intervalos de los índices Barthel y MMSE



Figura 2.2: Ruta propuesta para la emulación

En caso contrario, el usuario necesitaría ayuda para incrementar su eficiencia a la hora de resolver la situación en cuestión o incluso para poder efectuar la maniobra. En este caso, todas las pruebas se han efectuado sin ofrecer ayuda alguna al usuario, por lo que puede observarse en la tabla que en la mayoría de los casos los usuarios carecen de la capacidad de efectuar muchas maniobras o sus eficiencias son inferiores a lo deseado.

La Fig. 2.3 muestra los distintos caminos que recorren los 6 usuarios emulados. Puede observarse que todos concluyen la ruta propuesta, ya que se descartaron a priori a partir de sus pruebas reales candidatos que no pudiesen hacerlo por sí mismos. Se ha usado un código de color tentativo donde el usuario con mayores dificultades físicas y cognitivas aparece en rojo, mientras que el que presenta mejor condición en ambos aspectos se presenta en verde. Las diferencias más notables entre unos y otros, principalmente en la capacidad de mantener el vehículo en línea recta y el momento en que se determina que se debe efectuar el giro. Como cabía esperar, el usuario 909 -el que mejor condición física y cognitiva presenta- es el que realiza la trayectoria más acertada, mientras que el 903 es el que más se abre en media.

Si observamos los casos pertenecientes a la clase *ASOV* que aparecen en esta ruta, vemos que los más comunes son el 1,2 y 6, que todos los usuarios resuelven con mayor o menor tino a excepción del 806 y el 903 y el usuario 808, que tiene problemas con el caso 2 (Tabla 2.6). Estos casos se dan en el tramo medio y final del recorrido, donde disponemos de bastante espacio para maniobrar y el objetivo se encuentra en visión. Podemos ver su correspondencia con comandos de usuario en la Tabla 2.3: dos de los comandos corresponden a giros hacia la izquierda y uno a la derecha. Es inmediato observar en el recorrido propuesto (Fig. 2.2) que al alcanzar el final del pasillo, comienza un giro pronunciado hacia la izquierda. Este giro no es inmediato: los usuarios realizan un pequeño giro previo a la derecha para aumentar su distancia con respecto a la pared antes de girar. A continuación, se continúa girando casi hasta llegar a las inmediaciones de la puerta principal, donde se producen una serie de ajustes para el proceso de alineación para atravesar la puerta. Puede observarse que los usuarios 806, 903 y 808, de hecho, tienden a abrirse preventivamente más que el resto para el giro de cara a poder efectuarlo más suavemente, aunque esa maniobra los acerque demasiado a la pared derecha.

Clase	SubClase	Usuario						Prototipo
		806	808	903	905	906	909	
ASOV	1		X	X	X	X	X	X
	2				X	X	X	X
	3							
	4					X		X
	5							
	6		X		X	X	X	X
	7							
	8			X				X
BSOV	1							
	2							
	3			X		X	X	X
	4							
	5							
	6	X	X		X	X	X	X
	7							
	8	X	X		X	X	X	X
	9							
	10							
	11							
	12							
	13							
	14							
	15							
	16	X	X	X	X	X		X
	17	X	X	X		X		X
BS01	1							
	2	X						X
BS02	1		X					X
	2							
	3							X
	4						X	X
	5							

Tabla 2.6: Comparativa perfiles: casos usados en prueba "ir a puerta"

La clase *BSOV* tiene su ocurrencia principalmente en el pasillo, que es estrecho, pero mantiene el objetivo en línea de visión. Los comandos en esta sección primordialmente buscan mantener la dirección para atravesar el pasillo en línea recta. Es el caso de las subclases 8 y, en menor frecuencia, 3 y 17. Al final del pasillo, los usuarios realizan habitualmente una maniobra de giro hacia la derecha, antes de girar a la izquierda. Este efecto también lo reflejan las subclases 6 y 16, que corresponden a un giro hacia la derecha para acercarse al objetivo por un área más abierta. Puede observarse como el usuario 909, que ha prescindido de las clases 16 y 17 en su trayecto, se desvía continuamente por el pasillo hacia la izquierda y, en consecuencia, está forzado a empezar el giro a la izquierda para entrar en la habitación contigua tarde y de forma brusca, necesitando

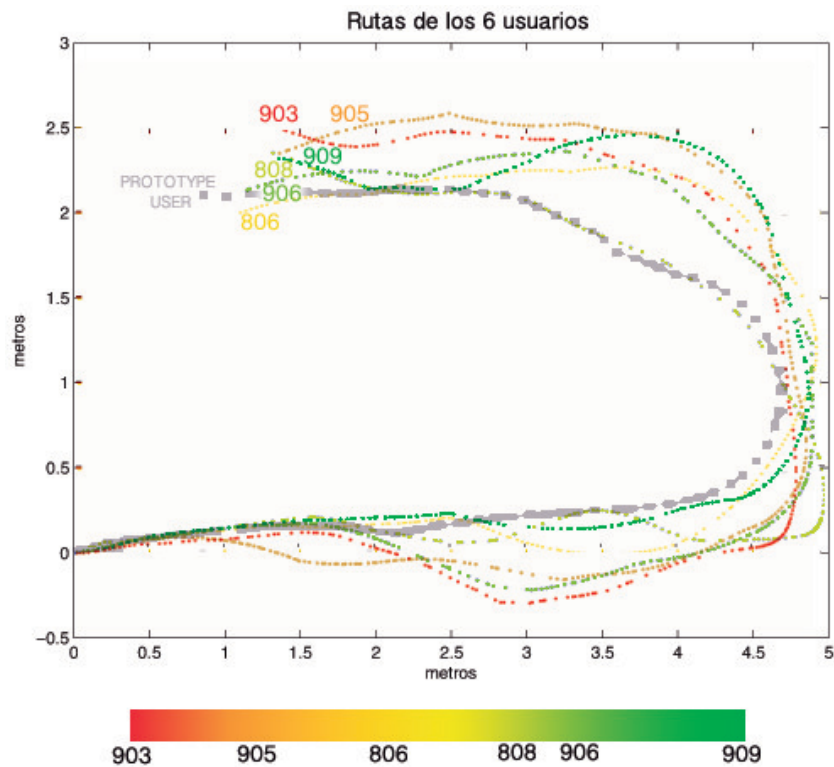


Figura 2.3: Rutas de los usuarios emulados

compensarlo más adelante. Algunos usuarios carecen de la clase 3, pero como ésta no aparece con mucha frecuencia, no supone un problema en la trayectoria.

Las clases *BS01* y *BS02* tienen relativamente poca frecuencia de aparición, siendo residuales en el prototipo. Su aparición es puntual en el pasillo, en las situaciones en que el usuario se acerca demasiado a la pared. Sobre todo en el tramo final del pasillo, cuando comienza la maniobra de giro. Generalmente se trata de clases que se emplean para pequeñas modificaciones de las trayectorias, un ajuste fino que muchos de los usuarios no son capaces de efectuar pero sin los cuales pueden operar igualmente.

La tabla 2.7 muestra los resultados globales de los distintos usuarios en la prueba en comparación con la trayectoria que recorrería el usuario prototipo. Puede observarse que, curiosamente, la eficiencia del prototipo no es en absoluto la más alta. Debemos recordar que el prototipo no es el usuario más eficiente posible, sino una compilación de los usos más habituales a la hora de resolver situaciones. Es por ello que, tal como se aprecia en la Fig. 2.3, su trayectoria tiende a acortar el camino efectuando el giro en U de la forma más pronunciada posible. Esta acción tiene un efecto negativo local en la directividad y la suavidad, que deviene en que los usuarios que se abren mucho más para girar tengan una eficiencia global más elevada. Sin embargo, tal como se observa en la tabla, todos ellos, salvo el usuario 909 -el que mejor condición física y cognitiva presenta y que, de hecho, conduce de forma más parecida al prototipo- ven elevados sus tiempos de navegación más de 90 segundos y sus distancias más de un metro. En realidad, tiempo y distancia no serían importantes de no ser porque, habitualmente, incrementos



de tiempos muy elevados suelen estar relacionados con haber encontrado situaciones complicadas a resolver que en trayectorias más cortas no han llegado a aparecer.

Dado que muchos sistemas de navegación basan sus resultados en comparar las trayectorias efectuadas con una trayectoria canónica previamente definida, queda por resaltar que el método propuesto también lo hace posible: sea cual sea la tarea a efectuar, siempre podemos emular cómo la realizaría el usuario prototipo y comparar los resultados de nuestros voluntarios -o robot- con ella sin necesidad de haberla definido a priori ni mostrar marcas en el suelo. La última fila de la tabla 2.7 muestra la diferencia por mínimos cuadrados de todas las trayectorias mostradas con la del prototipo. Tal como hemos indicado con anterioridad, el usuario 909 efectúa una trayectoria bastante similar al prototipo, mostrando un valor de sólo 23.89 frente al siguiente menor, el 806 -condición física y cognitiva media- que ya sube a 95.47. Más que definir la bondad de las trayectorias efectuadas, este valor muestra cómo de parecido a un usuario estándar es el conductor en cuestión; hay que resaltar que siempre hay varias formas de resolver el problema y todas son válidas en tanto permitan concluir con éxito la actividad deseada.

	909	906	905	903	808	806	Prototipo
$\bar{\eta}$ (%)	49.01	65.11	64.04	57.75	55	64.05	52.15
tiempo (sec)	52.02	151.32	160.86	137.83	139.65	167.02	51.32
distancia (m.)	8.98	10.10	10.01	9.90	9.75	10.11	8.79
mse. con Prototipo	23.89	147.32	228.25	173.54	95.47	115.36	X

Tabla 2.7: Comparativa perfiles: resultados en prueba "ir a puerta"

Es interesante notar que, si bien el prototipo nos permite compararnos con lo que habría hecho un usuario estándar.<sup>en</sup> las mismas circunstancias que el que en ese momento manipula la silla, es posible completar las trayectorias sin necesidad de disponer de todas las clases o de que el conductor las emplee con igual o mayor eficiencia que el prototipo. La principal diferencia radica en que las trayectorias resultantes son diferentes, ya que al resolver las situaciones de forma distinta, no necesariamente pasan por los mismos lugares. Es por ello interesante evaluar a lo largo de la trayectoria las diferencias de eficiencia entre el usuario y lo que el prototipo hubiera hecho en su lugar, evento que no se ha dado porque, probablemente, sus trayectorias han sido distintas. Esta estimación es interesante de cara a decidir cuanta ayuda necesita el usuario en cada instante, independientemente de lo que se podría considerar la trayectoria canónica" que, de hecho, no está siguiendo.

La Fig. 2.4 muestra las eficiencias de los usuarios 909, 903 y 806 -condición física y cognitiva buena, mala y media, respectivamente- a lo largo de la trayectoria, así como las mencionadas diferencias con el prototipo en función de la situación a que se enfrentan en cada región. Es interesante observar que los usuarios 909 y 806 mantienen una eficiencia bastante estable después de entrar al pasillo inicial, con variaciones puntuales al comenzar las maniobras, mientras que el usuario 903 presenta oscilaciones a lo largo de toda la trayectoria, así como la eficiencia media más baja, como cabía esperar. De hecho, como comentamos anteriormente, el usuario 909 retrasó el giro en U y tuvo que llevarlo a cabo de forma brusca, lo que se evidencia también en una bajada de su eficiencia en el tramo medio, que se recupera poco a poco. Lo que resulta interesante en todos los casos es observar cómo se comparan los usuarios en términos de eficiencia con el prototipo. En teoría, para manejar la silla como un usuario medio, las diferencias deberían estar sobre la línea roja de la figura que marca el 0. Es inmediato constatar que el usuario 909, que presenta buena condición física y cognitiva, es prácticamente siempre superior al prototipo, principalmente en los tramos inicial y final del trayecto en que simplemente hay que mantener direcciones para

desplazarse en línea recta. Los casos en que se comporta peor que el prototipo generalmente están relacionados con situaciones puntuales donde debería corregir la trayectoria para posicionarse para un giro o efectuar el giro de forma más suave, ya que la simple observación visual de este voluntario evidenció que tendía a maniobrar de forma un tanto brusca. En conclusión, a este usuario habría que darle poca ayuda y sólo en situaciones puntuales. Si observamos al usuario 903, es inmediato constatar que es el que presenta diferencias de eficiencia más negativas respecto al prototipo, que podrían imposibilitar realizar según qué trayectorias. Al contrario que 909, 903 se mantiene cerca del prototipo en muchas ocasiones, pero presenta diferencias muy notables debido a sus oscilaciones de eficiencia. Es un caso típico de usuario que necesitaría mucha ayuda, pero sólo de forma puntual. El usuario 806 es bastante estable en cuanto a eficiencia pero, desafortunadamente, generalmente está por debajo del prototipo buena parte del tiempo. Se trata de un perfil representativo de usuario que necesita poca ayuda, pero de forma continuada.

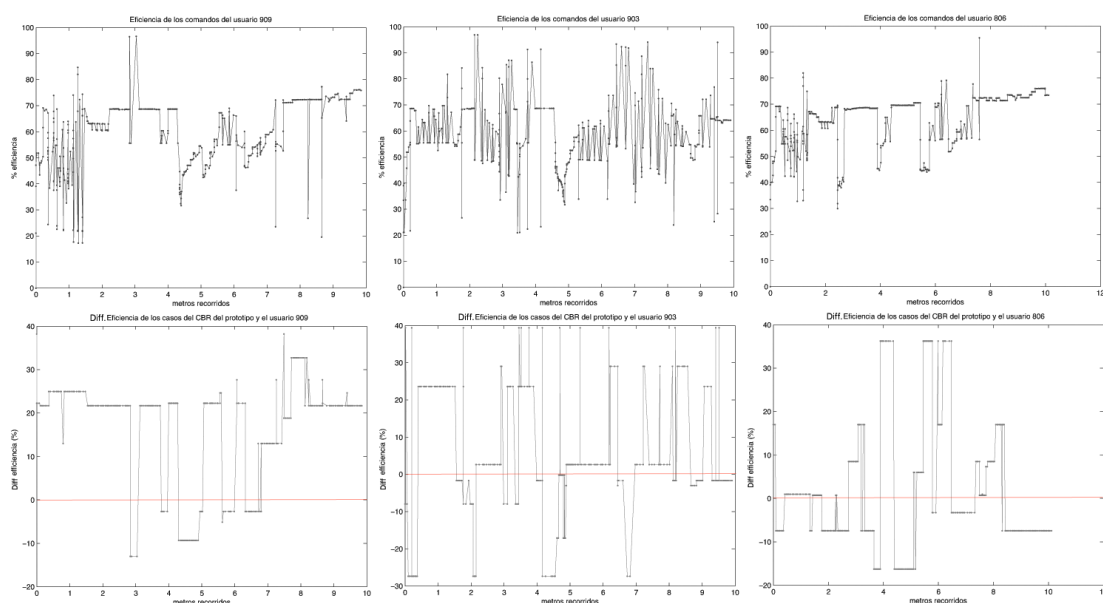


Figura 2.4: Eficiencia y diferencia de eficiencia con el prototipo para los usuarios 909, 903 y 806 a lo largo de la trayectoria propuesta.

## 5. Conclusiones

Este capítulo se ha centrado en caracterizar la forma de conducir de un usuario determinado de sillas de ruedas de cara a determinar cuanta ayuda puede llegar a necesitar respecto a lo que se consideraría la normalidad. Después de evaluar los distintos tipos de métricas existentes en este campo, se ha comprobado que las más adecuadas al propósito expuesto son las basadas en habilidades, que determinan hasta qué punto el usuario es capaz de llevar a cabo una determinada maniobra. Sin embargo, las métricas evaluadas pertenecientes a ese grupo no son aplicables a nuestro problema, ya que requieren instalaciones especiales y suelen estimarse en momentos puntuales. Alternativamente, pueden emplearse las métricas basadas en tarea, que en su versión local si permiten evaluar con qué dificultad el usuario acomete una determinada maniobra. Sin embargo, tal como se ha comentado, lo idóneo no es subir al máximo la eficiencia de un usuario

para lidiar con cada situación que enfrenta, sino darle la mínima cantidad de ayuda necesaria para que pueda resolverla dentro de la normalidad. Esto ha llevado a la necesidad de establecer un usuario prototipo, con el que poder comparar cómo se está desarrollando en cada momento el usuario real al que se debe aportar ayuda.

Dado que no existe nada parecido a un usuario prototipo, en tanto que cada persona conduce de una manera particular y, además, el impacto de una discapacidad es muy variado e imposible de acotar a priori, se ha optado por obtener un perfil artificial a partir de las trazas de pruebas reales llevadas a cabo por más de 80 usuarios durante 3 años en FSL, Roma, incluyendo voluntarios con distintos grados de discapacidad física y cognitiva y miembros del equipo médico y científico. Para ello se procedió a efectuar un proceso jerárquico de clusterizado de datos en tres fases. Primero, se dividieron todos los datos de las distintas pruebas en clases dependientes únicamente de la disposición del entorno a nivel local. Cada una de estas clases se dividió en subclases en función de la posición relativa de silla y objetivo, usando el índice Davies Boulding para determinar el número más apropiado de subclases que optimizase la partición. Finalmente, se efectuó una última división teniendo en cuenta los comandos de los usuarios, es decir, cómo resolvían cada situación posible. Los prototipos finales de las clases se extrajeron mediante la media de los elementos de cada clase promediada por la eficiencia local de la solución correspondiente, de forma que el representante de una clase no es necesariamente la solución más numerosa, sino también la más eficiente. De esta forma los outliers se filtran de manera natural. Nuestro usuario prototipo ofrece, por tanto, la solución más habitual a cada una de las posibles situaciones locales que pueden darse en navegación de interiores. Concatenando estas soluciones, podemos obtener cualquier ruta mediante un proceso de emulación, si se desea comparar los resultados de una persona o algoritmo de navegación con lo que efectuaría un usuario "estándar". Se ha comprobado la validez de esta metodología comparando los resultados de 6 usuarios con distintos grados de discapacidad efectuando una trayectoria compleja en interiores.

No obstante, nuestro interés en disponer de un prototipo radica en estimar cuánta ayuda necesita exactamente para alcanzar el estándar un usuario determinado. Usando la metodología propuesta, se puede calcular fácilmente la diferencia entre lo que el usuario está haciendo en un momento dado y lo que haría el prototipo para cada situación posible en navegación de interiores. En función de dicha diferencia, es posible cuantizar la cantidad de ayuda a ofrecer, tal como se mostrará en el siguiente capítulo. El propósito último de esta metodología es personalizar la ayuda tanto como sea necesario para posibilitar desempeñar las labores de navegación necesarias para las ADL, pero evitando siempre excesos de ayuda que podrían causar frustración o pérdida de capacidades residuales.



“  
 –How is it that you always manage to come up with the worst case scenario?  
 –I practice.  
 Stargate”

## 1. Introducción

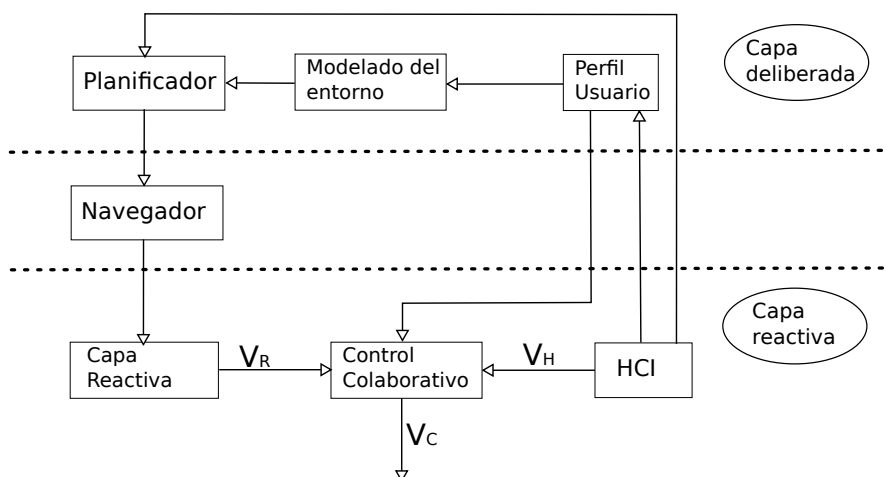


Figura 3.1: Arquitectura en capas de CARMEN

En capítulos anteriores se ha abordado la necesidad de adaptar la cantidad de ayuda a cada usuario de forma adaptable. Para ello se propone una metodología reactiva que, en cada momento, estima las necesidades del usuario y las completa hasta llegar a lo que se definió en el capítulo 2 como el perfil de un usuario estándar. Así, el usuario puede desplazarse por el camino que elija de forma adecuada. Sin embargo, cabe considerar hasta qué punto no resulta aconsejable que los caminos elegidos estén igualmente adaptados al perfil de cada persona, de forma que se le

recomienden rutas de mínimo esfuerzo para cumplir con su *AVD*. Este objetivo supone una capa deliberada capaz de tener en cuenta el perfil de habilidad de cada persona, es decir, de incorporar su mapa de capacidades bien al modelo del entorno, bien al algoritmo de planificación en sí. El propósito final de esta capa deliberada es realizar una planificación centrada en el usuario. Para integrar esta capa deliberada en nuestra filosofía reactiva, se propone utilizar una arquitectura híbrida. La ruta sugerida para el usuario será propagada secuencialmente a una capa de bajo nivel capaz de adaptarse reactivamente a las necesidades del usuario mediante el módulo navegador, siguiendo el flujo de la Fig. 3.1. Este capítulo se centrará en la generación de rutas centradas en el usuario, mientras que el próximo capítulo desarrollará cómo integrar la intención del usuario directamente en la navegación local.

## 2. Modelado del entorno centrada en usuario

### 2.1. Estado del arte

La capacidad de navegación de una capa deliberada se basa en cómo memoriza y procesa el entorno mediante una estructura de datos determinada. Además, si se pretende emplear en entornos dinámicos, esta estructura de datos debe tener dos características fundamentales: I) poder ser actualizada fácilmente conforme el robot se desplaza, y II) facilitar el procesado cuando se pretenda realizar una acción compleja -p. e. la búsqueda de camino mínimo o la autolocalización-.

Las dos aproximaciones más empleadas en generación de mapas para entornos de interiores pertenecen a los paradigmas métrico y topológico [91, 92]. El paradigma métrico utiliza una representación exacta y fidedigna del entorno: obstáculos y zonas libres son modelados de acuerdo a relaciones geométricas absolutas. Una de las técnicas más usuales consiste en dividir el entorno en celdas cuadradas de tamaño constante a las que se asigna una determinada probabilidad de ocupación (*occupancy grids*) [93]. Esto refleja directamente la información sensorial captada por el agente y resulta relativamente fácil de aprender y mantener. Solo es necesario una estructura de datos donde reflejar las lecturas de los sensores en función de estrategias de actualización -no especialmente costosas - [94].

Evidentemente, este tipo de representación es muy vulnerable a errores métricos (p. e. errores odométricos o de *slippage*) ya que cualquier error en localización supone importantes desplazamientos sobre el *grid* en la información capturada. Estos errores se pueden prevenir con técnicas de autolocalización eficientes [95]. Sin embargo, su mayor limitación es la resolución: una representación útil para navegación o localización requiere celdas de tamaño pequeño, elevando el volumen de información almacenado y el coste de procesado en función del tamaño del entorno almacenado.

Los mapas topológicos, por contra, transforman el entorno en un conjunto de regiones caracterizadas por la dificultad de su recorrido. La representación del mapa topológico es un grafo con regiones por nodos y arcos que describen la relación espacial entre ellos [96]. Es una representación mucho más compacta [97], lo que implica un procesado de alto nivel computacionalmente mucho más ágil. La complejidad del mapa obtenido es proporcional a la del entorno modelado. Esto permite optimizar el procesado de alto nivel tanto en tiempo como en recursos. Otra ventaja adicional es su tolerancia a errores de medida, dado que el mapa topológico no es una representación física exacta del entorno. Sin embargo, estos mapas no representan el espacio no explorado, por lo que no es posible planificar caminos fuera de los ya recorridos. Además, la topología está sujeta a problemas como el exceso de nodos o ambigüedades que deben resolverse con postprocesado [98].

Si se analizan en detalle, ambos paradigmas se caracterizan por su complementariedad. El

problema radica en obtener el conjunto de nodos y arcos a partir de la información sensorial para constituir la representación topológica. La tendencia actual es tratar de combinar ambos paradigmas [91, 92, 96, 97], generando representaciones del entorno topológicas, pero asociadas a información procedente de mapas geométricos locales o globales.

La combinación métrico-topológica puede realizarse partiendo desde el mapa topológico hacia el métrico (*paradigma descendente* o *top-down*) o infiriendo el mapa topológico desde el métrico (*paradigma ascendente* o *bottom-up*). Los mapas híbridos *top-down* más difundidos son los relacionados con el trabajo de Kupers [99], basados en sus estudios sobre el razonamiento espacial humano [100]. El conocimiento espacial es representado mediante una *ontología* jerárquica de representaciones, el *Spatial Semantic Hierarchy (SSH)*, consistente en varios niveles de mapas topológicos y métricos. El *SSH* ha sido extendido de diversas formas: con la incorporación de *diagramas de Voronoi* [96], uso de múltiples hipótesis en la construcción del mapa [101], ...

Un conjunto importante de los métodos de *paradigma descendente* se basan en la estructura del *quadtree* [102]. Se construye dividiendo toda región no uniforme en cuatro cuadrantes iguales. El proceso de división se repite de forma recursiva hasta obtener regiones uniformes o de un tamaño mínimo.

Este tipo de representaciones no son estrictamente topológicas. Consecuentemente, plantean dos problemas fundamentales. El primero de ellos se deriva de caracterizar la región por su centroide. Esto afecta a tareas como la búsqueda de caminos, que depende enormemente de las posiciones relativas de los obstáculos, especialmente si estos están localizados en las fronteras de cuadrículas de distintos tamaños [103].

La otra limitación tiene lugar en el proceso de partición. Dado que opera siempre con la misma estructura métrica, no tiene en cuenta la verdadera distribución de probabilidades de ocupación del entorno. Así aparecen numerosos nodos de pequeño tamaño en torno a los obstáculos presentes. Esta distribución se opone frontalmente al paradigma descendente, donde existe un nodo por región del espacio [96].

Para tratar de corregir el primer problema, se han propuesto dos soluciones: I) el desplazamiento del origen del *quadtree* [104], que no soluciona realmente el problema ya que al solventarlo para un determinado obstáculo puede replicarlo en otro; y II) el empleo de los *framed-quadtree* [105], que consiste en rodear cada región uniforme (*quad*) con un conjunto de celdas de mínimo tamaño. De esta forma, el camino puede atravesar la región desde cualquier punto hasta cualquier otro, permitiendo la obtención de caminos prácticamente óptimos [103]. Sin embargo, los *framed-quadtree* no eliminan la dependencia con respecto a la filosofía de división del entorno.

Aunque siguen otra filosofía de actuación, los métodos basados en los *roadmaps* también tratan de reducir la complejidad que presentan los mapas geométricos [106] sin generar un mapa puramente topológico. Básicamente, la representación generada por el método del *roadmap* probabilístico es una red de caminos que conectan una serie de nodos o posiciones libres de obstáculos, obtenidas aleatoriamente muestreando el espacio de posibles posiciones. Contrariamente a lo que se creía, la mayor limitación que tienen es la conectividad de la red y no el grado de cobertura del espacio. Un elemento vital de los planificadores híbridos es el análisis de conectividad [106].

El método de la partición de resolución variable (*variable-resolution partitioning*) [107] usa una técnica de interpretación neuronal de la lectura de los sensores para obtener un mapa métrico local, que luego usa para modelar los contornos de los obstáculos mediante líneas rectas. Estas líneas, al ser propagadas, permiten segmentar el entorno de forma bastante óptima. El problema del método surge cuando los contornos de los obstáculos no son sólo paralelos o perpendiculares, sino que adoptan distintos ángulos.

El mapa métrico-topológico propuesto por Pradeep [108] actúa de forma similar, pues también

usa un mapa métrico local para modelar el espacio que rodea al agente. Sin embargo, este método usa dicha información para obtener un mapa geométrico global, y sólo se obtiene una representación topológica cuando se ha explorado todo el entorno.

Dentro del conjunto de métodos que integran de forma estricta métodos geométricos y topológicos, posiblemente la mejor referencia sea la aproximación estadística propuesta originalmente por Thrun [109]. Sin embargo, el método propuesto no genera un único mapa, sino que emplea un mapa topológico para localización y otro geométrico para navegación. El principal problema es que la ubicación de los nodos del mapa topológico no es obvia, por lo que la construcción correcta de dicho mapa es clave.

Nuestro modelado del entorno parte de un mapa métrico del entorno y genera diferentes mapas topológicos en base a él. La información métrica no desaparece de los mapas topológicos, garantizando la coherencia entre ambos.

El método que se propone trata de concentrar la información del mapa geométrico en un grafo de nodos. Cada uno de estos nodos representará a una región de celdas con características homogéneas, pero cuya forma puede ser irregular. La característica aglutinadora de los nodos es su grado de similitud con respecto a las situaciones descritas en [89]. Para obtener este conjunto final de nodos se emplea una estructura jerárquica de niveles con un mapa geométrico como base, reduciendo en cada nivel el conjunto de nodos respecto al nivel inferior mediante la agrupación de celdas próximas.

El resultado obtenido en cada nivel es un mapa topológico con nodos que poseen asociada una región en la base, y que define un grafo de conectividades o líneas de paso entre regiones. La conectividad entre regiones está ponderada por la habilidad del usuario de afrontar dichas situaciones. El perfil descrito por [88] nos permite identificar la relación entre situaciones elementales de navegación y eficiencia del usuario. El grafo resultante será por tanto subjetivo, es decir, específico para cada usuario y dependiente de la ruta escogida.

## 2.2. Segmentación

La forma más eficiente de reducir el tamaño del mapa geométrico, consiste en agrupar los conjuntos de celdas conectadas con una propiedad común en un único nodo, descrito por esta misma propiedad. El nodo resultante proporcionaría la misma información pero, al contrario que la celda, ese valor debería acompañarse por información sobre las celdas asociadas a él. Si la región de celdas asociadas al nodo no tiene una forma regular, su contorno o distribución deberá ser conocida. Toda esta información podría representarse mediante tablas o listas enlazadas [103], pero este tipo de estructuras son variables en el espacio y no resultan compatibles generalmente con la mayoría de las herramientas de procesamiento.

Se propone el empleo de dos estructuras distintas que permiten reducir la información del mapa geométrico en un conjunto de niveles con un número de nodos exponencialmente decreciente. De esta forma, se podrá disponer en la misma estructura de un mapa geométrico, fácilmente actualizable y donde se podría llevar a cabo, por ejemplo, el trazado final del camino, y de un mapa topológico, con un número de nodos fijo y donde se podría realizar la búsqueda de dicho camino. Las estructuras empleadas se basan en las pirámides de enlace adaptativo descritas en [110] para el tratamiento de imagen.

Una pirámide es una secuencia de mapas generados a resolución progresivamente menor partiendo de una *base* o mapa inferior uniforme (mapa geométrico inicial). La pirámide enlazada original presenta limitaciones importantes [111] para nuestra aplicación. La primera es que se trata de un algoritmo recursivo y por lo tanto con una mayor demanda de recursos. Requieren de una selección manual del mapa en que se trabaja, no siendo sistematizable. Además, no existe



garantía de la conectividad entre las regiones adyacentes y esto es imprescindible para nuestra aplicación.

Los elementos de cada nivel, (*nodos*), son obtenidos inicialmente empleando una estructura de enlaces 4-a-1, que implican que cada nodo *-padre-* del nivel  $l+1$  tendrá un parámetro que representa a los  $2 \times 2$  nodos inmediatamente inferiores en el nivel  $l$  *-hijos-*. En nuestro caso, el parámetro que describe la similaridad u homogeneidad entre dos nodos adyacentes es la pertenencia a una misma situación elemental de navegación en la orientación en que se encuentran, tal como fueron descritas por Mínguez en [89]. Hay que tener en cuenta que aún no estamos considerando la posición de objetivos, por lo que las situaciones serán:

- seguras o no seguras, en función de si hay obstáculos adyacentes;
- anchas o estrechas, en función del espacio libre a su alrededor.

El modelo es independiente de la navegación y ,por tanto, carece de posición relativa de objetivo y robot. Esa información se introducirá en una fase posterior, en la navegación de un nodo a otro.

La estructura que se propone a continuación está plenamente adaptada para su uso en la construcción de mapas topológicos del entorno. Para ello parte de un conjunto de premisas entre las que se encuentran:

- Despreciar la información de los nodos detectados como obstáculos, pues carecen de utilidad.
- Binarizar la información sobre ocupación del mapa. Aunque los nodos puedan conservar el valor real de probabilidad de ocupación, a la hora de formar regiones conectadas los nodos se agruparan en regiones libres o no exploradas.
- Definir el conjunto final de nodos del mapa topológico de manera totalmente no supervisada, de forma que el tamaño final de éste sólo dependa de la geometría del entorno.

La definición de los enlaces de esta estructura, obedecerá a un algoritmo de cuatro pasos básicos:

1. Umbralización de los valores de la base. Los nodos se clasifican, en función de su valor de probabilidad, en nodos libres, ocupados y no explorados. Esta umbralización se realiza definiendo dos valores de umbral (obstáculo y espacio libre). Todos los nodos de la base serán entidades homogéneas.
2. Generación del resto de niveles de la estructura. En este caso no existe proceso iterativo, actualizándose para cada nodo de la estructura cuatro campos importantes:
  - Homogeneidad. Si los cuatro nodos hijos inmediatamente bajo el nodo a crear son similares y los cuatro se catalogan como homogéneos, entonces el nodo creado será homogéneo.
  - Tipo de región. Vector que indica a cual de las regiones se identifica (seguro/no seguro, ancho/estrecho) en cada orientación.
  - Área. Suma de los valores de área de los cuatro nodos hijos.
  - Posición. Es la ubicación relativa dentro del mapa.

Cabe reseñar que, paralelamente al cálculo de estos valores por nodo, si se determina que un nodo es homogéneo, los campos *Posición* de los cuatro hijos que lo forman se actualizan al valor del padre. Una vez finalizado este paso, la estructura de enlaces ya distingue regiones homogéneas, pero éstas presentan una forma regular, y no reflejan la verdadera distribución presente en el espacio.

3. Fusión de nodos homogéneos. Este paso descendente se encarga de reenlazar, si es posible, nodos homogéneos aún no enlazados a ningún padre. Básicamente, se trata de enlazar este nodo al padre de alguno de sus nodos vecinos. Para que se cree este enlace se deberán de cumplir dos condiciones:
  - El valor de probabilidad de ambos nodos, futuro padre e hijo, sea igual.
  - La distancia entre los centroides de las regiones que ambos nodos representan en la base no supere un determinado umbral, *DistMax*, que dependerá del tamaño máximo de región que se desee crear finalmente en la base.

Tras la fusión de estos nodos se completa parte de la estructura de enlaces, obteniendo ahora nodos superiores que representan a regiones no homogéneas en la base. Sin embargo, aún quedan zonas en la base de probabilidad uniforme y que no se encuentran fusionadas.

4. Clasificación de nodos raíz. Los nodos homogéneos se fusionan si están conectados y son similares. Este paso completa totalmente la estructura de enlaces. Por lo tanto, el algoritmo sólo posee un parámetro interno importante seleccionable por el usuario, que es el valor del umbral que determina el tamaño máximo de las regiones, *DistMax*. Dicho umbral no resulta, sin embargo, decisivo a la hora de conformar el conjunto de regiones del mapa topológico. La Fig. 3.2 muestra el conjunto de regiones resultante para el mapa de la Casa Agevole.

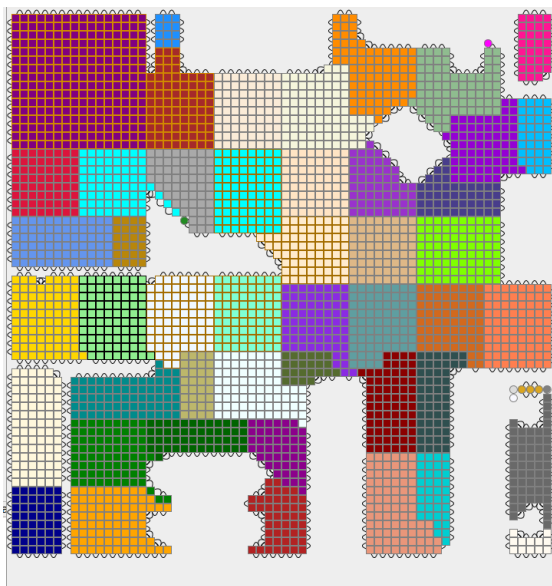


Figura 3.2: Clasificación de los nodos de la piramide

Las regiones se corresponden con una situación local descrita en la sección 3. No tienen en cuenta la posible situación de la silla dentro de la región o del objetivo. Esa información estará disponible cuando elaboremos la ruta concreta entre una región de origen y destino. Durante el proceso de navegación, utilizaremos el centroide de la región para ubicar tanto la silla de ruedas como los objetivos.

Las dos ventajas de este algoritmo de construcción de mapas topológicos son: I) que las regiones que forman el mapa están forzosamente conectadas, y, dado que esta premisa forma parte de la creación del mapa, para conseguirlo no se consume un tiempo excesivo (por debajo de los 150 ms. para un mapa de 256x256 ); y II) que la selección de los nodos del mapa topológico se lleva a cabo de forma no supervisada en los distintos niveles de la estructura jerárquica.

### 2.3. Creación del grafo dirigido del entorno

Tras el último paso del algoritmo de segmentación, todos los nodos pertenecen a una *clase*. Cada clase posee un nodo padre que la describe completamente, en su nivel más alto de aparición. El conjunto de nodos padre de las clases presentes en el entorno forman una partición del espacio.

La existencia de conectividad entre las regiones viene dada por su contigüidad en la base. El peso de los enlaces viene determinado por la dificultad de ir de una región a otra. Por lo tanto, la conectividad no es únicamente dependiente de la distancia entre regiones, ni recíproca. Es en este punto dónde el modelo del entorno se ajusta al usuario.

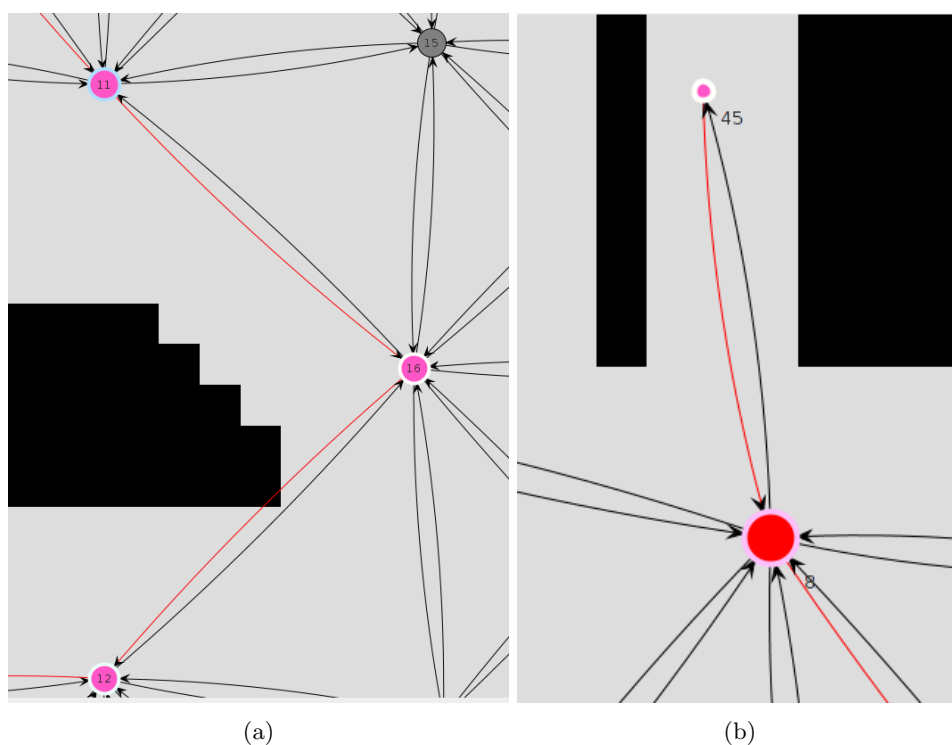


Figura 3.3: Ejemplos de anisotropía de la navegación

Por ejemplo, la Fig. 3.3a muestra la conexión entre las regiones 11,16 y 12. Un usuario con problemas para girar a la derecha, pero con capacidad de girar a la izquierda, encontraría muy

diferentes los caminos de ida y vuelta. Otro ejemplo, la Fig. 3.3b muestra la transición entre la región 45 y 8. Navegar desde la región 45 a la 8 requiere vigilar sólo los obstáculos de los laterales. Por contra, navegar de la 8 a la 45 requiere tener en cuenta además la pared del fondo.

Los arcos que conectan las regiones son direccionales y poseen un peso que refleja esta dificultad. El peso básico es la distancia euclídea entre los centroides de las regiones. Esta distancia está multiplicada por una envolvente que evalúa la dificultad de la transición entre regiones para cada usuario en particular.

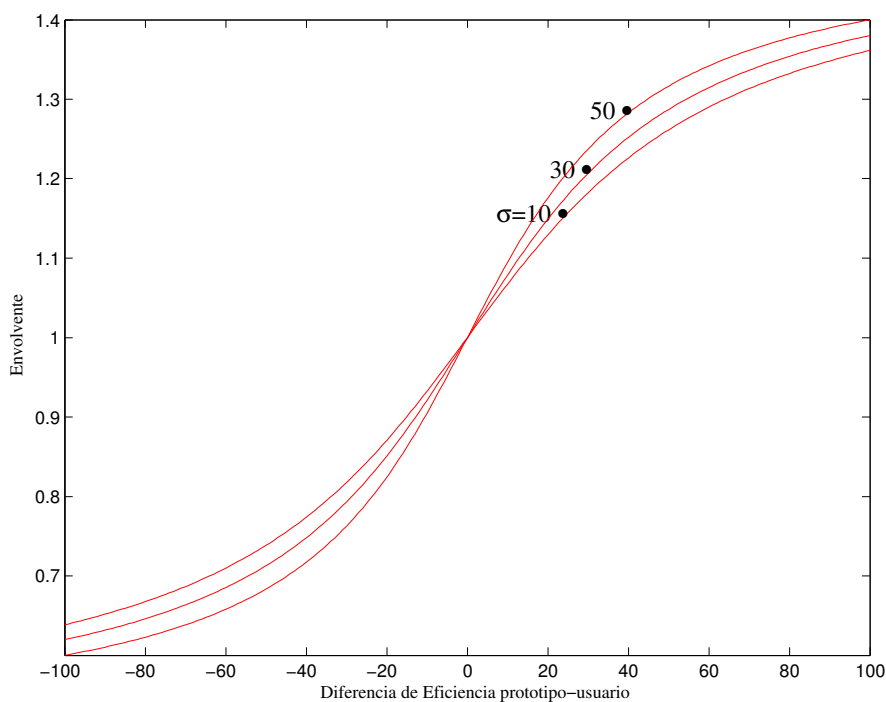


Figura 3.4: Función de envolvente de pesos

La envolvente obedece a la ecuación 3.1, y hace uso de los perfiles presentados en el capítulo 2. Cuanto mayor sea la diferencia entre el rendimiento prototipo y el del usuario para esa región ( $\eta_{prototipo} - \eta_H$ ), más se penalizará esa conexión. Además, los usuarios que presenten una variabilidad de su rendimiento ( $\sigma_{\eta_H}$ ) mayor tendrán una curva más abrupta, el peso se incrementará más para diferencias similares. De esta manera, un usuario con mucha variabilidad en su rendimiento evitará a toda costa las regiones dónde este es menor, ya que probablemente ahí sea *mucho* peor. La fig. 3.4 muestra este efecto, sobreimpresionando curvas con diferentes  $\sigma$ . Aquí podemos observar cómo un usuario con una varianza de 10, en un caso en que el prototipo tenga una eficiencia con un valor de 40 por encima de la suya, tiene una envolvente de 1.22. Mientras que en el mismo caso, un usuario con una varianza de 50 tendría una envolvente de 1.32.

$$E = \frac{1}{\pi} \operatorname{atan} \left( \frac{(\eta_{prototipo} - \eta_H)}{50 - 0,35\sigma_{\eta_H}} \right) + 1 \quad (3.1)$$

El proceso de marcado de las transiciones entre regiones se realiza para todos los elementos, evaluando ambos sentidos de la transición por separado. El resultado es un grafo dirigido que

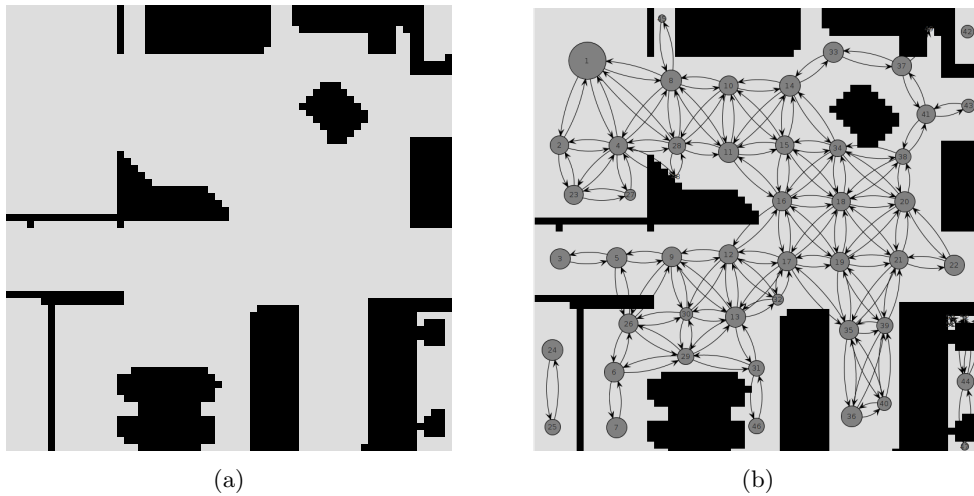


Figura 3.5: Ejemplo de mapa a particionar (a) y grafo dirigido resultante (b)

depende de la geometría del entorno y del usuario que lo recorre. La Fig. 3.5 muestra el resultado (b) para el mapa de la casa Agevole (a).

### 3. Navegación personalizada

#### 3.1. Estado del arte

La navegación es el proceso de guiado desde un punto de partida hasta uno de destino, evitando durante dicho trayecto cualquier obstáculo presente. Un planificador global busca el camino a alto nivel, usando la representación del entorno, de forma rápida y sin abordar su posterior seguimiento en detalle.

La planificación de rutas es un extenso campo de la robótica actual. En las últimas dos décadas, se han conformado dos filosofías de planificación de movimiento para vehículos robotizados: la determinista, basada en búsqueda de grafos heurística y la reactiva, basada en muestreo de los sensores del entorno [112]. La elección de una u otra estriba en las necesidades concretas del sistema a desarrollar.

Los algoritmos reactivos poseen un rendimiento independiente de la escala y admiten cambios dinámicos en el sistema, a costa de no garantizar una solución óptima [113]. Utilizan técnicas de inteligencia artificial que toleran inexactitudes del modelo del entorno [114], o no lo requieren en absoluto [115]. Incorporan en tiempo real información de los sensores de detección de obstáculos a la decisión de planificación, por lo que son especialmente útiles en entornos inexplorados [116]. Estas técnicas son muy eficientes, pero se fundamentan en la convergencia local [117], por lo que son sensibles a mínimos locales.

Por contra, la planificación determinista ofrece una solución óptima. Su limitación reside en su pobre escalabilidad: tiene una complejidad cuadrática con el número de elementos. Dijkstra [118] es la referencia de todas las soluciones deterministas, por su robustez en la planificación de rutas más cortas. Implementa una búsqueda óptima que siempre devuelve la distancia más corta. La búsqueda exhaustiva se traduce en una merma de la velocidad, incremento del tiempo de cómputo y de la memoria necesaria [119]. Los algoritmos derivados de Dijkstra solventan este problema

de sobrecarga evitando explorar áreas innecesarias. Para ello añaden una estimación eurística de la distancia restante al objetivo cuando evalúan el próximo elemento de búsqueda. Es el caso del  $A^*$  [120], *D estrella* [121], y *D estrella optimizado* [122], muy utilizados en la planificación de rutas. La estima de la distancia se puede realizar mediante diferentes métricas: la euclídea [123], Manhattan [124] ...

Las métricas utilizadas para evaluar la mejor decisión no tienen porqué evaluar distancia únicamente. Existen circunstancias en las que otros parámetros son más relevantes para escoger una ruta. Este es el caso de la robótica espacial, donde los retardos de comunicación, la limitación de energía y la impredecibilidad del entorno priman sobre la distancia en la planificación de rutas. Por ejemplo, el *terrain traversability index* utiliza lógica difusa para generar unos mapas de navegabilidad [125] según las características del terreno. Basándose en este análisis de movilidad, en [126] se presenta una estrategia de planificación que utiliza varios factores dinámicos para escoger la mejor ruta. Evalúa las posibles rutas utilizando métricas como la rugosidad del terreno, la inclinación, la longitud, el índice de movilidad, posibles deslizamientos, ... La mejor ruta en términos de estos parámetros es seleccionada.

El planificador desarrollado en este capítulo seguirá una filosofía similar. Las rutas generadas incluirán parámetros no puramente espaciales. Se explotará la información ofrecida por el perfil del paciente para obtener la mejor ruta posible para ése usuario.

### 3.2. Búsqueda de caminos

Una vez definido el modelado del entorno utilizado en *CARMEN*, describiremos el proceso de navegación de alto nivel realizado sobre el mapa topológico. El cálculo de los nodos del mapa topológico a recorrer se puede realizar con cualquier algoritmo de búsqueda de caminos en grafos dirigidos. Dado que en nuestro sistema no se tiene un número elevado de nodos, empleará el algoritmo de Dijkstra [118], por ofrecer soluciones óptimas.

El primer paso es identificar a qué región pertenecen el punto de partida y destino. Esto es trivial, puesto que los puntos del mapa métrico tienen asociada una clase tras la clasificación. No resta más que aplicar el algoritmo de búsqueda de caminos al grafo de regiones del usuario para obtener una secuencia de regiones de paso.

La Fig. 3.6 muestra el camino entre las regiones 1 y 3 en ambos sentidos. Puede observarse que aunque la ruta atraviesa las mismas regiones, las regiones exhiben colores distintos. El color obedece al tipo de situación identificada, según el perfil que se mostró en el capítulo 2, en la sección 3. El esquema de colores utilizado es una partición del parámetro “tono” en *espacio de color (HSV)*, fijando los parámetros de “brillo” y “saturación” a uno.

El conjunto de regiones de paso aún no constituye aún un camino que pueda ser designado. Es en la segunda etapa dónde se obtiene el camino a seguir. Aquí utilizamos un algoritmo de campos de potencial mejorado sobre las regiones de paso. Este algoritmo consta de tres fases:

- Se calcula el esqueleto  $S$  de esta región.
- Se genera la función de campo de potencial numérico,  $V(\bar{x})$ , sobre dicho esqueleto,  $S$ .
- Se obtienen los puntos cambio de curvatura a lo largo de la ruta obtenida en la ruta de potencial numérico.

Finalmente, el camino a seguir está marcado sobre el esqueleto por ese potencial numérico. Y los objetivos intermedios vienen dados por los puntos de cambio de curvatura. A continuación se analizan cada una de estas etapas independientemente.

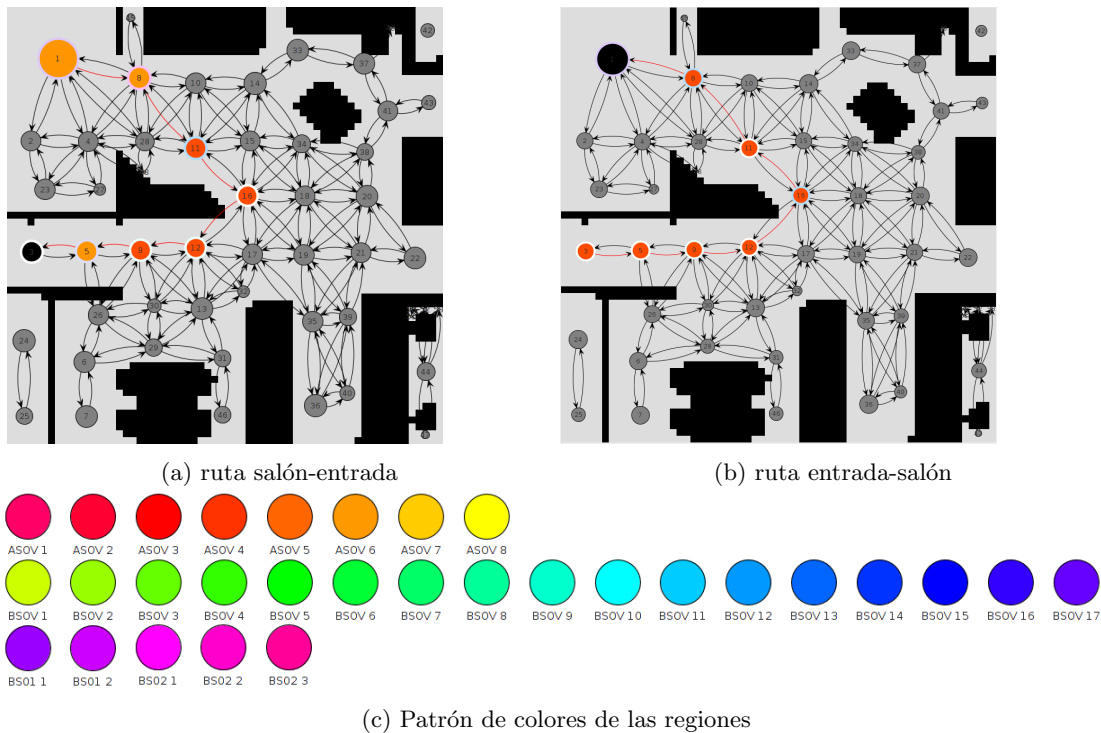


Figura 3.6: Ejemplo de ruta salón-entrada (a) y entrada salón (b)

### Cálculo del esqueleto de la región

Creemos en primer lugar un mapa de distancias a obstáculos en la región. El esqueleto de la región serán los puntos donde las distancias sean máximas. Para calcular este mapa de distancias a obstáculos,  $d(\bar{x})$ , se emplea el siguiente algoritmo:

1. Se inicializa el valor de  $d(\bar{x})$  de los puntos de la región a un valor infinito.
2. Se localizan los puntos de la región que estén en contacto con un obstáculo. Estos puntos se guardan en un vector  $L_0$  y su valor  $d(\bar{x})$  se pone a cero. Se fija la variable  $i$  a valor cero.
3. Para cada valor en  $L_i$ :
  - Se inicializa el vector  $L_{i+1}$ .
  - Se introducen en  $L_{i+1}$  con un valor  $d(\bar{x})$  igual a  $i + 1$  los puntos de la región que: I) estén en contacto con cualquiera de los valores de  $L_i$ , y II) su valor de  $d(\bar{x})$  sea infinito.
4. Se aumenta  $i$  en una unidad, y se vuelve al paso anterior, a no ser que  $L_i$  no tenga elementos.

Para obtener el esqueleto, necesitamos añadir a cada punto de la región información sobre el punto de origen que fijó su valor de  $d(\bar{x})$ . Para un punto  $(\bar{x})$  de la región, designaremos su origen como  $O(\bar{x})$ . Para calcularlos, podemos utilizar el siguiente algoritmo sobre los vectores  $L_i$  anteriormente calculados:

1. Para cada punto  $(\bar{x})$  en  $L_0$ , se fija  $O(\bar{x})$  igual a  $(\bar{x})$ .

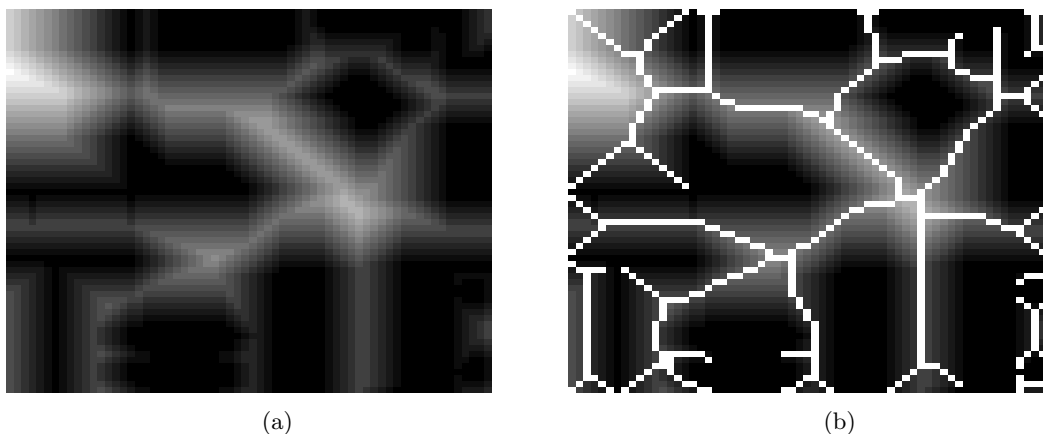


Figura 3.7: Fases del cálculo del esqueleto del mapa: a) mapa de distancias, b) esqueleto resultante

2. Para cada punto de  $L_i$ ,  $(\bar{x}_{L_i})$ , se actualizan sus puntos vecinos  $(\bar{x}_v)$ : I) Si  $d(\bar{x}_v)$  es infinito, se fija  $O(\bar{x}_v) = O(\bar{x}_{L_i})$ , II) En otro caso, si la distancia euclídea entre  $O(\bar{x}_v)$  y  $O(\bar{x}_{L_i})$  es mayor que un umbral ( $D_{skel}$ ), y  $(\bar{x}_{L_i})$  no pertenece al esqueleto  $S$ , se incluye  $(\bar{x}_v)$  en él.
3. Incluimos los puntos de inicio y final en  $S$  mediante el gradiente definido por el mapa de distancias.

La Fig. 3.7 muestra estas dos fases del algoritmo. Sobre este esqueleto es dónde se trazarán las rutas a seguir.

### Cálculo del camino

Aplicamos una técnica de propagación de onda sobre el esqueleto ya calculado. El proceso sería el siguiente:

1. Iniciamos el campo de potencial en el punto de destino,  $V(\bar{x}_{fin})$ , a cero.
2. Creamos un vector  $Q$ , en el cual se introduce el valor  $(\bar{x}_{fin})$ .
3. Mientras que el vector  $Q$  no esté vacío:
  - Extraemos el primer elemento del vector  $Q$ ,  $(\bar{x}_Q)$ .
  - Para cada vecino  $(\bar{x}_v)$  de  $(\bar{x}_Q)$  perteneciente al esqueleto  $S$  y que no haya sido marcado, hacemos  $V(\bar{x}_v) = V(\bar{x}_Q) + 1$ , y se inserta  $(\bar{x}_v)$  en  $Q$ .

El camino a seguir está marcado por el gradiente mínimo sobre el potencial del esqueleto. Los puntos más relevantes de este camino están determinados por los cambios de curvatura. Estos puntos de inflexión serán utilizados como objetivos intermedios en la navegación de bajo nivel.

## 4. Experimentos

Para probar la capa deliberada propuesta, en esta sección se va a probar cómo funciona la planificación para los tres voluntarios del capítulo anterior que ya presentamos en la prueba de



la Fig. 2.4, 909, 808 y 903 que correspondían a condición físicas y cognitiva buena, media y mala, respectivamente.

En esta ocasión, las pruebas de emulación se han llevado a cabo en un pasillo de la tercera planta del Hospedale Santa Lucia (*Fondazione Santa Lucia (FSL)*) (Fig. 3.8.a). Tal como se ha comentado, en una primera etapa y en ausencia de caminos a completar y, por tanto, intención por parte del usuario, se efectuó una primera división por tipo de región, que devolvió el resultado que se presenta en la (Fig. 3.8.b). Como cabía esperar, en esta fase las regiones corresponden básicamente a la división geométrica de la planta, apareciendo más regiones en áreas más complejas, si bien las áreas más amplias también se dividen a partir de cierto punto. Este es el efecto del parámetro de dispersión que evita que aparezcan nodos masivos -que aportarían poco de cara a la planificación- en áreas como pasillos largos o habitaciones muy amplias.

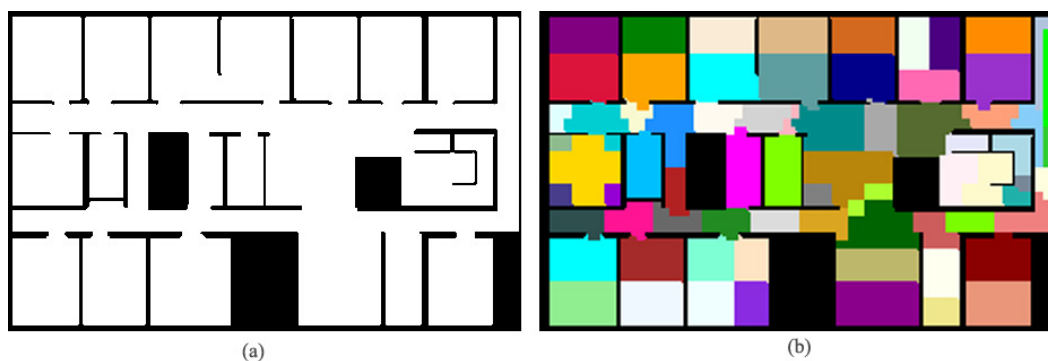


Figura 3.8: Entorno de pruebas: a) planta; b) presegmentación por tipo de región.

Una vez disponible el modelo presegmentado, se procedió a establecer una ruta entre dos habitaciones opuestas, las correspondientes a los nodos 6 y 9 de la topología. Tal como se ha explicado anteriormente, cuando se propone una ruta determinada ya es posible completar el modelo del entorno para determinar el tipo definitivo de cada nodo en función de la (posible) ubicación relativa del móvil y el objetivo. En estas pruebas, de cara a evidenciar las diferencias en cuanto a simetría de las trayectorias resultantes, ya que los mapas están en todo momento adaptados a las capacidades de los usuarios y éstas no son simétricas, se ha procedido a calcular para los tres usuarios el camino del nodo 6 a 8 y del 8 al 6. La tabla 3.1 muestra los resultados globales en cuanto a peso de la trayectoria seleccionada, eficiencia promedio de cada usuario a lo largo de dicha trayectoria y distancia recorrida.

En el caso de la trayectoria propuesta, el camino a seguir coincide en todos los casos, principalmente porque el rodeo necesario para seguir una ruta alternativa no compensa la ganancia en eficiencia para los usuarios implicados. Sin embargo, es inmediato comprobar cómo el peso asociado al camino varía para cada voluntario: mientras que el usuario 909 encuentra una dificultad de alrededor de 66 en ambos sentidos, ésta sube hasta 167 para el usuario 808. Curiosamente, el usuario 808 presentaba mejor índice Barthel y MMSE que el usuario 903, que sólo encuentra una dificultad de aproximadamente 76. Esto demuestra el supuesto del que se partió en un principio: los índices generales de condición no son suficientes para estimar cómo un usuario completará una trayectoria, ya que los problemas que encuentra están específicamente relacionados con cómo le ha afectado su discapacidad a nivel particular. Es interesante observar también que el peso del camino no depende tan fuertemente de su longitud -que está entre 25 y 30 metros en todos los casos- como en la metodología tradicional.

La eficiencia prevista de los usuarios al recorrer los caminos es, como cabía esperar, inversa

al peso de éstos: pasa de superar el 90 % (909) a un 45 % (808), alcanzando algo más del 75 % para el usuario 903, que se prevé que se desenvuelva bastante bien en el camino a pesar de que su condición de acuerdo a los índices empleados era sólo media.

Un análisis más detallado de los nodos, de acuerdo al esquema de color propuesto en la Fig. 3.6c apoya las consecuencias extraídas hasta el momento (Fig. 3.9). Los usuarios 909 y 903 presentan topologías similares: todos los nodos son BSOV, salvo en el caso del nodo 37 en el camino 6 a 8, que para el usuario 903 pasa a ser BSO2. En el camino de vuelta, sin embargo, para 903 el nodo 39 pasa a ser BSOV y para ambos el 37 se transforma en BSO2, dado que ambos usuarios parecen tener más problemas con las maniobras a la izquierda que a la derecha. Evidentemente, a pesar de encontrar dificultades parecidas en el camino, cada usuario tiene una eficiencia distinta a la hora de resolverlas, de ahí las diferencias en peso y eficiencia media en ambas trayectorias. Es también inmediato constatar que el usuario 808 lo encuentra todo más complejo: su topología en ambos sentidos tiene un número mucho mayor de nodos BSO2, que, como se puede recordar del capítulo anterior, están relacionados con situaciones más difíciles. Su eficiencia a la hora de lidiar con esas situaciones se resiente; de ahí el incremento de peso en un camino que, en longitud, no es muy superior al resto.

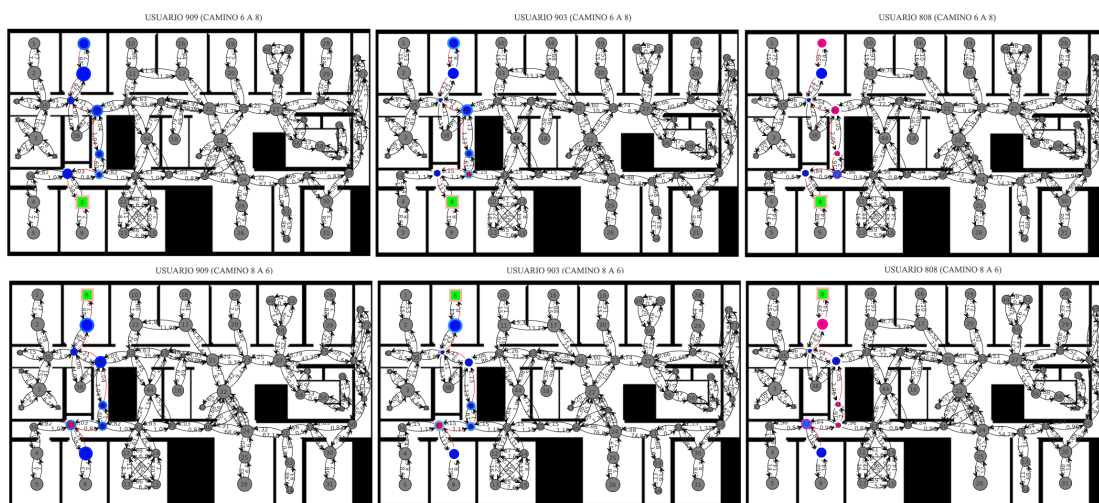


Figura 3.9: Caminos resultantes a nivel topológico para los 3 usuarios propuestos en ambos sentidos.

Usuario	909 (6-8)	909 (8-6)	903 (6-8)	903 (8-6)	808 (6-8)	808 (8-6)
Peso total	66,718	66,336	76,7	76,212	167,246	167,058
Eff. promedio	92,857	94,048	76,333	76,857	45,571	43,667
Distancia	26,67	27,67	28,67	29,67	30,67	31,67

Tabla 3.1: Resultados en los caminos de ida y vuelta entre los nodos 9 y 6 para los distintos usuarios.

Una vez obtenido el camino a nivel topológico, es necesario propagarlo a nivel métrico para poder traducirlo en comandos a los motores. Tal como se ha comentado en secciones anteriores, la propagación es inmediata en tanto que se trabaja con una estructura enlazada que mantiene la relación entre la topología y el mapa métrico en todo momento.

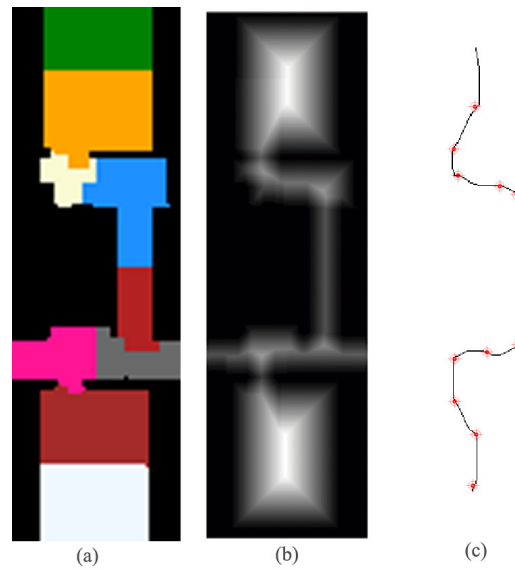


Figura 3.10: Propagación a nivel métrico: a) regiones enlazadas; b) campo de potencial; c) camino resultante y puntos de control.

La Fig. 3.10.a muestra las regiones a nivel métrico relacionadas con el camino topológico recomendado a los 3 usuarios. Este conjunto de regiones ya supone una región de paso libre de obstáculos y limitada por la geometría del entorno y del propio camino calculado por el planificador, por lo que se puede aplicar un campo de potencial en su interior (Fig. 3.10.b) para obtener una única trayectoria de mínimo potencial (Fig. 3.10.c) que comunique origen y destino, ubicaciones ambas contenidas en la región de paso por la propia naturaleza del sistema. En realidad, el usuario no está forzado en forma alguna a seguir el camino propuesto, sino que el planificador aporta sugerencias de por donde sería más sensato atravesar el entorno para obtener un esfuerzo mínimo. Estas sugerencias se enviarían al navegador local, donde usuario y robot negocian para determinar quién tiene más impacto en los comandos emergentes en cada momento. En tanto que el camino no se seguirá en forma alguna con precisión dada la contribución humana al control, no tiene sentido intentar ajustarse a él en cada instante, por lo que simplemente se estiman sus puntos de máxima curvatura -entendiendo estos como las ubicaciones en las que habría que alterar la trayectoria de forma significativa- y se alimentan de forma secuencial a la capa reactiva (Fig. 3.10.c). Si mientras la capa reactiva alcanza un objetivo parcial el entorno o los planes del usuario se ven afectados significativamente, el planificador volverá a calcular una ruta, eliminará los puntos restantes de la lista de objetivos parciales y los sustituirá con los nuevos empezando desde la ubicación actual del robot. Cabe resaltar que la adaptación al perfil de capacidad del usuario se lleva a cabo en dos etapas: por una parte, la capa deliberada busca el camino de menor esfuerzo en longitud y coste para el usuario y, por otra, la capa reactiva se encarga de aportar la ayuda necesaria para completar dicho camino.

## 5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un modelo de arquitectura híbrida para un sistema de navegación de control compartido. La principal novedad de la arquitectura propuesta es que todas las capas están adaptadas a las capacidades de navegación del usuario, de acuerdo al perfil propuesto en el capítulo anterior. Mientras que la capa reactiva se encargará de ofrecer ayuda de acuerdo a las necesidades del usuario, tal como se presenta en el próximo capítulo, la capa de planificación se encarga de buscar el mejor camino de acuerdo a las capacidades de éste.

Para ello, la capa deliberada se basa en un modelo topológico-métrico del entorno generado de forma jerárquica de acuerdo al paradigma descendente (top-down). La información geométrica del sistema se encuentra almacenada en todo momento en un conjunto de enlaces que relacionan el mapa métrico con los nodos de la topología, de forma que se pueda efectuar el cálculo de camino a alto nivel sin pérdida de información métrica. Los nodos se generan a partir de una rejilla de ocupación que se mantiene actualizada en cada momento, pero incorporando el tipo de región de cada celda (ASOV, BSOV, BSO1, BSO2). Una vez la estructura se ha generado, a la hora de calcular trayectorias -y, por tanto, cuando se dispone de información sobre la posición relativa del móvil y el objetivo- el modelo del entorno se completa de acuerdo a la eficiencia con que el usuario maneja cada una de las situaciones del perfil de usuario propuesto en el capítulo anterior para poder determinar la naturaleza real de cada nodo en las distintas trayectorias y, por tanto, estimar el coste para atravesarlas. Así, el planificador no sólo trabaja con la distancia, sino también con la dificultad para el usuario en cuestión de los caminos posibles.

La capa deliberada propuesta se acoge al paradigma híbrido del recomendador, es decir, propone la ruta que estima que le resultará menos dificultosa al usuario, si bien siempre queda a discreción de éste el aceptar la sugerencia o no. A partir del camino de nodos estimado como más adecuado, tras propagarlo a una región métrica de paso, se aplica un campo de potencial para obtener una ruta suave contenida en la región de paso sugerida. A partir de dicha ruta se obtienen sus puntos de máxima curvatura, que son las ubicaciones donde se producen cambios significativos de dirección, y, finalmente, estos puntos -denominados objetivos parciales- se alimentan consecutivamente a la capa reactiva, que se encargará de ayudar al usuario a alcanzarlos. Cualquier cambio de plan, modificación en el entorno o variación significativa disparará de nuevo la capa deliberada, que al funcionar de forma completamente jerárquica, es lo suficientemente rápida para crear planes alternativos mientras la silla está en movimiento.

El sistema propuesto se ha probado con distintos usuarios con perfiles de capacidad diferentes y se ha comprobado cómo el modelo de entorno varía y los costes se ajustan a las habilidades de cada uno.

“  
 –I’ve got a hum in my head, I’m gonna follow it.  
 –Oh, you’ve got something in there, but it’s not a brain.”  
 Farscape

## 1. Introducción

La mayor parte de las sillas de ruedas asistivas son sistemas relativamente modernos, por lo que su esquema de control habitual es el *híbrido*. Disponen de una parte *Deliberado* y otra *reactiva* unidas por un coordinador, equivalente al de la arquitectura *Three Tier (3T)*. Esto es debido a que las primeras sillas de ruedas asistivas eran fundamentalmente robots autónomos.

Este capítulo tratará de esta última capa, la reactiva. La capa reactiva busca ofrecer al usuario cuanto más control sea posible (y seguro). Precisamente este es el factor diferenciador entre las distintas aproximaciones a la navegación asistiva: *cómo* se transfiere el control entre el hombre y la máquina. Para cada situación hay que escoger el comando más conveniente de los dos.

## 2. Estado del Arte

Las sillas de ruedas no son los únicos robots operados con ayuda de una persona. Los robots de rescate, cirugía y de exploración espacial son teleoperados en parte. Todos poseen un grado de autonomía para corregir potenciales errores humanos o de comunicación. La *Autonomía Ajustable* estudia cómo transferir la capacidad de decisión entre una persona y uno o más robots. El objetivo final es hacer dicha transferencia adaptable, eficiente e intuitiva para los usuarios [127].

La *Autonomía ajustable (AA)* puede aplicarse a diferentes campos. En su versión más genérica, los agentes integrados en grandes organizaciones no solo interactúan con una o más personas, sino que también se coordinan con otros agentes en lo que se denomina *trabajo en grupo (teamworking)*. La mayor parte de los estudios en este campo están circunscritos a agentes *software*, asociados a personas o procesos y enfocados a la coordinación [12, 127]. También hay algunos trabajos en lo relativo a equipos de robots [128], que conforman un caso particular del problema sin intervención humana. Si nos limitamos a la interacción entre un usuario y un único

agente, el problema suele ser abordado desde el punto de la teoría de decisión [129]. Por otra parte, la *AA* aplicada a los agentes *físicos* se centra en la teleoperación [15, 130, 131].

Las sillas de ruedas asistivas se incluyen dentro de esta categoría, conformando el campo conocido como *control compartido* [15–18]. Existen diferentes aproximaciones al *control compartido* según *cúanta* la autonomía del usuario.

El modo de navegación con *Salvaguarda (safeguard)* otorga control completo al usuario salvo en situaciones de emergencia. Entendemos por situación de emergencia un peligro inminente, un fallo de comunicación [132, 133] o un control humano inadecuado [19] [20, 21]. Bajo esas circunstancias el vehículo se detiene o activa un algoritmo reactivo. Por ejemplo un algoritmo *DWA* es utilizado en [24, 34] para evitar obstáculos inminentes. El control robótico puede dispararse sólo en situaciones especiales, no necesariamente peligrosas, para realizar maniobras complejas. Además, el cambio en el control puede no ser automático y estar a criterio del usuario, como un piloto automático. Este tipo de aproximaciones suele articularse en torno a un conjunto de acciones como *EsquivarObstáculo*, *SeguirPared*, *CruzarPuerta* para asistir a la persona en estas maniobras [15, 17, 22–25].

Si con esto no es suficiente, existe un paso más: señalar el objetivo y que el robot realice la navegación de forma totalmente autónoma [28] [31–34]. Aquí la silla se comporta como un robot autónomo, con la salvedad de que el usuario puede retomar el control a voluntad [24].

En cualquier caso, la clave del *control compartido* está en *cómo* detectar cuándo conmutar el control. En el caso del modo de navegación con *Salvaguarda (safeguard)* es un umbral de seguridad, expresado habitualmente en términos de distancia al obstáculo más cercano. En otras modalidades es el usuario quien decide si activar o no las acciones. Es decir, una o más entradas sensoras disparan los comportamientos, supeditando al usuario. La conclusión es que *control compartido* siempre conmuta de forma exclusiva entre usuario y máquina.

La variante de *control compartido* denominada control colaborativo [80] permite solventar estas limitaciones. El control colaborativo combina de forma continua los comandos ofrecidos por usuario y máquina. Es necesario que la incorporación de esta información no deteriore las cualidades que un buen algoritmo de navegación ha de tener.

### 3. Navegación óptima

Los algoritmos de navegación óptimos están basados en técnicas de optimización. Estas garantizan que siempre se alcanza el objetivo de una forma segura y relativamente directa. Para ello, buscan minimizar una función de coste escalar utilizando un gradiente negativo descendente. El campo vectorial generado describe una ruta óptima hacia el destino. La función escalar puede obtenerse mediante métodos exactos tales como los algoritmos de propagación de onda [134] y algoritmos de ruta más corta [135] o métodos heurísticos tales como los algoritmos de *maximum clearance* (máximo espacio libre) [136].

*Potential Fields Approach (PFA)* es una familia de algoritmos de navegación inspirados en métodos de esquivar de obstáculos. *PFA* superpone diferentes campos de potencial artificiales: un campos atractores hacia los objetivos y campos repulsores para evitar los obstáculos. Son una versión muy sencilla de funciones de coste, muy rápidas de calcular pero no muy precisas o estables [137]. Además, *PFA* también están limitadas por la presencia de mínimos locales. Por ejemplo, la Fig. 4.1 muestra cómo una diferencia mínima en el mapa original hace que un objetivo sea inalcanzable.

Existe un subconjunto de funciones de potencial que no sufren de estas limitaciones. Son las *Función de Navegación (FN)*, propuestas originalmente en [138].

Más concretamente, una *FN*  $\varphi$  es una función potencial  $\mathbb{C}^2$  en un subconjunto del espacio

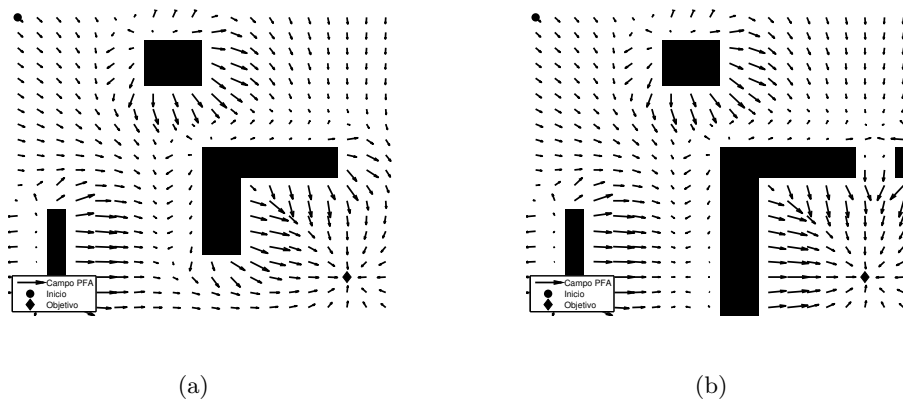


Figura 4.1: Ejemplo de PFA (a), y trampa local (b)

o variedad compacta  $Q$  tal que  $\varphi : Q \rightarrow [0, 1]$ . Su diferencia más relevante con respecto a otras funciones de potencial es que garantizan un único mínimo global en su entorno, tal que  $\varphi(\bar{q}_G) = 0$ . Además alcanza su máximo en las fronteras de  $Q$ , de forma que  $\varphi(\partial Q) = 1$ .

Esta función permite desarrollar un controlador autónomo que converge al mínimo  $\bar{q}_G$  desde cualquiera de los puntos de  $Q$ , sencillamente siguiendo el gradiente negativo de la función de navegación [139]. Estas funciones son difíciles de implementar para entornos dinámicos. Mucho más si tenemos en cuenta requisitos de tiempo real. Por lo tanto, tienen serias limitaciones para entornos no estructurados [140].

Sin embargo, las propiedades de las  $FN$  garantizan una convergencia continua hacia un mínimo único dentro del espacio donde están definidas. Nuestro algoritmo de control compartido (control colaborativo) utiliza estas propiedades para evaluar los comandos de navegación emergente, premiando aquellos que se acercan más al comportamiento de una  $FN$ . La intervención humana introduce variaciones impredecibles, lo que limita la capacidad para alcanzar soluciones análogas a las de las  $FN$  en cualquier situación, por lo que resulta imposible garantizar el cumplimiento de las propiedades en todo momento. Sin embargo, en el capítulo describiremos cómo el control colaborativo se beneficia de estas propiedades para minimizar las limitaciones propias de algoritmos reactivos como el  $PFA$ , de forma que aproxima la interacción hombre-máquina a la navegación autónoma basada en  $FN$ .

## 4. Control colaborativo

El algoritmo original de control colaborativo es una versión continua e implícita de control compartido, basada en métodos de esquivas de obstáculos [80]. Los comandos de usuario y robot se combinan de forma reactiva en un nuevo comando emergente. La combinación de comandos es tal que permite extender algoritmos de navegación autónoma en el dominio del control compartido.

Más concretamente, los comandos robóticos son generados mediante una versión modificada de  $PFA$  [141]. Esa técnica permite combinar diferentes objetivos y restricciones de forma continua, es decir, la intención del usuario puede ser modelada como un objetivo adicional en el  $PFA$ .

El control colaborativo introduce propiedades de las  $FN$  en el ámbito del control compartido. Los usuarios se benefician de propiedades tales como una navegación sin discontinuidades y con un objetivo único. El algoritmo combina los comandos de usuario y robot en una función que comparte propiedades con el gradiente de una  $FN$ . En nuestra aproximación, el usuario recibe



únicamente la ayuda imprescindible: mientras peor sea su rendimiento, mayor la ayuda. Esto mejora la aceptación del usuario, incrementa la suavidad y evita discontinuidades que afectan a también al robot.

El control está descrito por el vector  $\vec{V}_C$ . Este incluye una componente proporcionada por el usuario  $\vec{V}_H$ , a través de un dispositivo de entrada (generalmente un joystick) y otra componente  $\vec{V}_R$  generada por el control robótico, por ejemplo a través de *PFA*. Esta aproximación fue originalmente propuesta en [142].

$$\vec{V}_C = \vec{V}_R + \vec{V}_H \quad (4.1)$$

El control se reparte equitativamente entre usuario y control robótico. Esta puede ser una opción arriesgada: nada impide que el usuario realice maniobras peligrosas o conduzca erráticamente. Otros usuarios simplemente pueden producir comandos inadecuados para situaciones específicas. Esta solución es, además, discontinua. La convergencia tampoco está garantizada, ya que la componente no analítica introducida por el usuario ( $\vec{V}_H$ ) no es necesariamente convergente.

Para compensar este problema en nuestra solución original se tuvo en cuenta la eficiencia local de los comandos  $\vec{V}_R$  y  $\vec{V}_H$ : ambos vectores de la Ec. 4.1 fueron ponderados para suavizar las transiciones de control. Este reescalado solventa la mayor parte de los problemas de convergencia que pueda presentar  $\vec{V}_R$  (caso de ser un *PFA*). Y además mejora la continuidad del comando emergente.

La eficiencia local se representa por el parámetro  $\eta$ . Es una métrica local, sin memoria y reactiva. Por consiguiente, carece de ninguna información temporal tales como curvatura o longitud de la trayectoria.

$$\vec{V}_C = \eta(\bar{q}_i, \vec{V}_R) \vec{V}_R + \eta(\bar{q}_i, \vec{V}_H) \vec{V}_H \quad (4.2)$$

Los comandos, por tanto, son evaluados mediante  $\eta$  en función de su similitud a una *FN*.  $\eta$  tiene una componente por cada requisito de una *FN*. Rimon and Koditschek [138] enunciaron las propiedades de una *FN*:

1. continúa (al menos en  $\mathbb{C}^2$ ),
2. mínimo local único en  $\bar{q}_G$  en el componente conectado del espacio libre que lo contiene (función polar),
3. máxima a lo largo de la frontera de  $Q$ ,
4. es una función Morse (sus puntos críticos son no-degenerados).

La cuarta propiedad no puede ser garantizada analíticamente por la inclusión de  $\eta$ . Esta propiedad está relacionada con la presencia de puntos silla. Sin embargo, la intervención humana elimina estas situaciones. Por lo tanto, no es necesario definir un factor adicional en  $\eta$  para su cumplimiento. Finalmente,  $\eta$  es la composición de tres factores, como se puede ver en la ec. 4.3.

$$\eta(\bar{q}_i, \vec{V}) = \frac{\eta_{sm}(\bar{q}_i, \vec{V}) + \eta_{dir}(\bar{q}_i, \vec{V}) + \eta_{sf}(\bar{q}_i, \vec{V})}{3} \quad (4.3)$$

La introducción de  $\eta$  en la ec. 4.2 refuerza las condiciones de *FN* en el control colaborativo. A continuación presentaremos en detalle cada uno de los factores de  $\eta$  en relación con la propiedad correspondiente de una *FN*.

La Fig. 4.2 resume todos los parámetros necesarios para el cálculo de  $\eta$ .



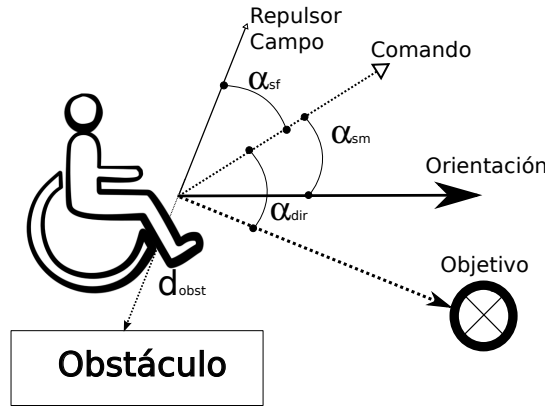


Figura 4.2: Parámetros de  $\eta$

Las constantes  $C_i$  permiten adaptar el sistema a entornos específicos, características de la silla de ruedas, etc... Por ejemplo, una silla con un centro de masa alto, debe tener un  $C_{sm}$  alto para evitar posibles inestabilidades. Un entorno lleno de obstáculos requiere de un  $C_{sf}$  alto, pero  $d_{dmax}$  bajo para ajustar  $\eta_{sf}$  adecuadamente. Sus valores iniciales pueden ser ajustados para encajar en los requisitos del escenario. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones serán válidos los valores para una silla de ruedas robotizada estándar en interiores.

#### 4.1. Suavidad

El factor de suavidad  $\eta_{sm}$  penaliza los cambios de dirección bruscos en el comando  $\vec{V}$ . Se corresponde con el primer requisito de las FN: continuidad al menos en  $\mathbb{C}^2$ . Cualquier valor que implique una discontinuidad del movimiento será compensado por este factor. Su valor es proporcional al ángulo  $\alpha_{sm}$  entre la orientación en la posición  $\bar{q}_i$  y el comando propuesto  $\vec{V}$ . La ec. 4.4 incluye una constante positiva  $C_{sm}$  para ajustar la sensibilidad de la suavidad en  $\eta$  (ver Fig. 4.2).

$$\eta_{sm} = e^{-C_{sm} \cdot |\alpha_{sm}|} \quad (4.4)$$

#### 4.2. Directividad

La directividad  $\eta_{dir}$  relaciona la orientación con el objetivo. Una FN debe ser polar, es decir, debe tener un único mínimo localizado en  $\bar{q}_G$ . El gradiente de dicha función debe aproximarse siempre a este mínimo. Aunque no nos es posible garantizar esta condición para cualquier comando, si que podemos reforzar esta tendencia.

El ángulo formado por el comando de movimiento propuesto y la dirección del objetivo es un indicador claro de esta característica. Ese ángulo ( $\alpha_{dir}$ ), debería ser pequeño en una función polar. La ec. 4.5 tiene por lo tanto un máximo para el ángulo  $0^\circ$ . Igualmente, incluimos una constante positiva  $C_{dir}$  para controlar la sensibilidad de  $\eta_{dir}$  en  $\eta$ .

$$\eta_{dir} = e^{-C_{dir} \cdot |\alpha_{dir}|} \quad (4.5)$$

### 4.3. Seguridad

Este factor ( $\eta_{sf}$ ) penaliza a los comandos dirigidos hacia los obstáculos y, en general, cualquier comando que nos acerque a ellos. Una  $FN$  debe ser máxima e uniforme en las fronteras del espacio  $Q$ , conformado por los obstáculos del entorno. Hemos de tener el potencial máximo en esas fronteras, y su gradiente ha de ser normal a él.

Si establecemos un campo de potencial artificial entre los obstáculos más cercanos y el robot, obtenemos un vector alejándonos de la zona más peligrosa. El ángulo entre este vector y el comando propuesto ( $\alpha_{sf}$ ) indica nuestra desviación con respecto a una situación de máxima seguridad. A menor  $\alpha_{sf}$  más nos acercamos a la situación de una  $FN$ , normal a la frontera. También tenemos en cuenta la distancia al obstáculo más cercano  $d_{obst}$ , normalizada por la máxima distancia medible  $d_{max}$ . Esta corrección atenúa la influencia de este factor con la distancia. Y para controlar la sensibilidad de este factor, se incluye una constante positiva  $C_{sf}$ .

$$\eta_{sf} = 1 - e^{-C_{sf} \cdot |\alpha_{sf} + \frac{d_{obst}}{d_{max}}|} \quad (4.6)$$

### 4.4. El control colaborativo como función de navegación

La relación entre las  $FN$  y  $\eta$  puede resumirse en tres requisitos, proporcionados cada uno por un factor de  $\eta$  :

- Las discontinuidades son compensadas por  $\eta$  .
- El mínimo único es proporcionado por  $\eta$  en  $\bar{q}_G$ .
- Los comandos emergentes son normales a las fronteras de  $Q$ .

Aquí analizaremos detalladamente la relación entre el control colaborativo y las propiedades de una  $FN$ , tal y como fue definida en [138]. Estudiaremos cómo el comando colaborativo  $\vec{V}_C$  posee las mismas propiedades que el gradiente de una  $FN$   $f(\bar{x})$ . Es decir, demostraremos la siguiente igualdad:

$$\vec{V}_C(\bar{x}) = \vec{\nabla} f(\bar{x}) \quad (4.7)$$

Para ello, utilizaremos el operador lineal de divergencia. Concretamente, la divergencia de dos dimensiones en coordenadas cartesianas:  $\vec{\nabla} = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ .

Vamos a realizar unas simplificaciones en la notación en esta sección. Aunque los comandos de entrada  $\vec{V}$  son función de la posición de la silla de ruedas  $\bar{x}$  y del mapa  $M$ , se denotarán mediante  $\vec{V}(x)$ . La eficiencia de los comandos también depende de la posición y el mapa,  $\eta(\vec{V}(\bar{x}, M), \bar{x}, M)$ , pero en este análisis se denotará simplemente como  $\eta(\vec{V}(\bar{x}))$ .

### 4.5. Continuidad

Una  $FN$   $f(\bar{x})$  es, por definición, continua. Si aplicamos el operador divergencia a la definición de función continua:

$$\lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} f(\bar{x}) = \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^-} f(\bar{x}) \quad (4.8)$$

Podemos sustituir el gradiente de la  $FN$  utilizando la ec. 4.7.

$$\begin{aligned}\nabla \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} f(\bar{x}) &= \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \nabla f(\bar{x}) = \\ &= \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} [\eta(\vec{V}_H(\bar{x}))\vec{V}_H(\bar{x}) + \eta(\vec{V}_R(\bar{x}))\vec{V}_R(\bar{x})] = \\ &= \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \eta(\vec{V}_H(\bar{x})) \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \vec{V}_H(\bar{x}) + \\ &+ \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \eta(\vec{V}_R(\bar{x})) \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \vec{V}_R(\bar{x})\end{aligned}$$

Dado que la eficiencia y los comandos de robot son funciones continuas, la propiedad de continuidad depende del límite:

$$\begin{aligned}\lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \eta(\vec{V}_H(\bar{x})) \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^+} \vec{V}_H(\bar{x}) &= \\ = \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^-} \eta(\vec{V}_H(\bar{x})) \lim_{\bar{x} \rightarrow \bar{C}^-} \vec{V}_H(\bar{x})\end{aligned}$$

No podemos garantizar que el comando proporcionado por el humano es continuo. Sin embargo, hemos definido  $\eta$  para que en los puntos con cambios abruptos de dirección su valor tienda 0. Por lo tanto, esta condición incrementa la convergencia del comando colaborativo con respecto al del usuario y se cumple cuando los comandos  $\vec{V}_R(\bar{x})$  sean continuos.

#### 4.6. Función polar

Una función polar cumple que:

$$f(\bar{x}) > f(\bar{q}_G) \quad \forall \quad \bar{x} \in Q \quad (4.9)$$

Por lo tanto tiene un único mínimo en el punto de destino  $\bar{q}_G$ . Las condiciones necesarias de mínimo local son:

- La primera derivada parcial es igual a 0 en el punto crítico,
- Las segunda derivada parcial es mayor que 0.

$$\nabla f(\bar{q}_G) = \vec{0} \quad (4.10)$$

$$f_{xx}(\bar{q}_G) > 0 \quad (4.11)$$

$$f_{yy}(\bar{q}_G) > 0$$

Podemos expresar la ec. 4.10 utilizando la ec. 4.7 como:

$$\begin{aligned}\nabla f(\bar{q}_G) &= \eta(\vec{V}_H(\bar{q}_G))\vec{V}_H(\bar{q}_G) + \\ &+ \eta(\vec{V}_R(\bar{q}_G))\vec{V}_R(\bar{q}_G)\end{aligned} \quad (4.12)$$

Cualquier comando en  $\bar{q}_G$  tendrá baja eficiencia, ya que nos alejaría del objetivo. El único comando en esta situación con eficiencia alta es  $\vec{0}$ . Hemos supuesto que  $\vec{V}_R(\bar{q}_G)$  es nulo, pero el comando del usuario puede no anularse. Sin embargo, el comando colaborativo en el destino mejora su condición de polar gracias al bajo valor de  $\eta_H$ .

Para desarrollar la ec. 4.11 también utilizamos la ec. 4.7. Tomando el caso genérico de la doble parcial con respecto a una variable  $x_i$ :

$$\begin{aligned}
f_{x_i x_i}(\bar{q}_G) &= \frac{\partial f(\bar{q}_G)}{\partial x_i x_i} = \frac{\partial \nabla_{x_i} f(\bar{q}_G)}{\partial x_i} = \\
&= \frac{\partial}{\partial x_i} [\eta(\vec{V}_H(\bar{q}_G))V_{Hx_i}(\bar{q}_G) + \eta(\vec{V}_R(\bar{q}_G))V_{Rx_i}(\bar{q}_G)] = \\
&= \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \eta(\vec{V}_H(\bar{q}_G)) \right] V_{Hx_i}(\bar{q}_G) + \eta(\vec{V}_H(\bar{q}_G)) \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} V_{Hx_i}(\bar{q}_G) \right] + \\
&\left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \eta(\vec{V}_R(\bar{q}_G)) \right] V_{Rx_i}(\bar{q}_G) + \eta(\vec{V}_R(\bar{q}_G)) \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} V_{Rx_i}(\bar{q}_G) \right]
\end{aligned}$$

Se tomó como prerrequisito que el comando  $\vec{V}_R$  tiene valor  $\vec{0}$  en el punto  $\bar{q}_G$ . Es un mínimo del comando robótico y un valor máximo de eficiencia. Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x_i} \eta(\vec{V}_R(\bar{q}_G)) &\rightarrow C_1 > 0 \\
\eta(\vec{V}_R(\bar{q}_G)) &= 1 \\
\frac{\partial}{\partial x_i} V_{Rx_i}(\bar{q}_G) &\rightarrow C_2 > 0
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Esto es, la componente de la derivada correspondiente al comando robótico es positiva y no nula. Nos queda que la derivada segunda es:

$$f_{x_i x_i}(\bar{q}_G) \simeq \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \eta(\vec{V}_H(\bar{q}_G)) \right] V_{Hx_i}(\bar{q}_G) + \eta(\vec{V}_H(\bar{q}_G)) \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} V_{Hx_i}(\bar{q}_G) \right] + C_3$$

Por lo que respecta al factor dependiente de los comandos  $\vec{V}_H$ , se cumple automáticamente en caso de ser polares. En esos casos, el razonamiento es análogo al hecho para  $\vec{V}_R$ , obteniéndose también una constante positiva. Para los casos en que los comandos de usuario no son polares (y se alejan del objetivo), la eficiencia es baja, disminuyendo su influencia. La parcial de la eficiencia se comporta de igual manera que la eficiencia, dado que es una exponencial. Por lo cual se refuerza la condición de polaridad del comando.

#### 4.7. Máximo en las fronteras

Esta condición garantiza la seguridad de la navegación, y que el robot no abandona la región delimitada. Es expresable cómo:

$$f(\bar{x}) \leq f(\bar{q}_O) \nabla f(\bar{q}_O) \perp \bar{q}_O$$

Por la igualdad entre gradiente y comando emergente (ec. 4.7) podemos decir que el comando emergente en la frontera ha de ser normal a la misma. Para conseguirlo,  $\eta$  reescala los vectores que componen el comando emergente. La Fig. 4.3 muestra el mismo campo que en la Fig. 4.1a, pero escalado utilizando  $\eta$ . El factor de eficiencia  $\eta_{sf}$  es directamente proporcional al ángulo entre el comando y la normal a la frontera  $\alpha_{sf}$ .  $\eta_{sf}$  incluye además la proximidad a los obstáculos, acentuando la influencia del ángulo con la normal.

Si la componente  $\vec{V}_H$  no es normal a la frontera, su módulo será mucho menor por efecto de  $\eta_{sf}$ . Finalmente, el comando emergente cumplirá la condición de  $FN$ .

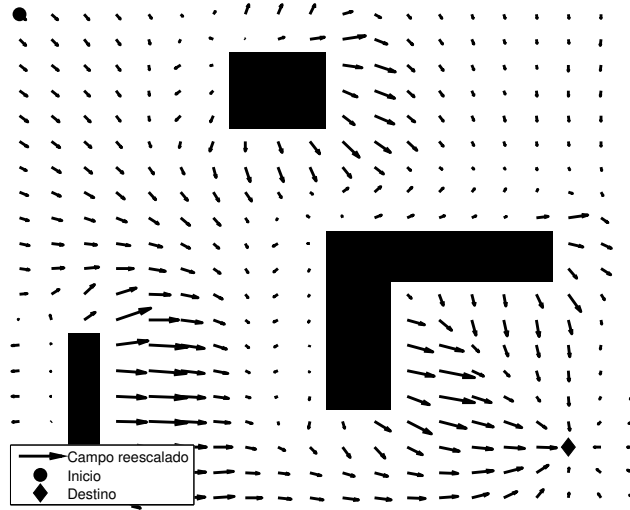


Figura 4.3: Campo PFA escalado por  $\eta$

#### 4.8. Función Morse

Una función Morse es aquella en la que sus puntos críticos son no-degenerados. Estos puntos habrán de ser necesariamente máximos o mínimos. Dado que además hablamos de una función polar, concluimos que el único punto crítico de la función es el mínimo situado en  $\bar{q}_G$ .

$$\nabla f(\bar{x}) \neq \bar{0} \quad \forall \bar{x} \neq \bar{q}_G \quad (4.14)$$

Este requisito busca eliminar las trampas locales, de las que no se pueda salir. En estos puntos se cumple que:

$$\begin{aligned} \vec{V}_C(\bar{x}) &= \bar{0} \\ \eta(\vec{V}_H(\bar{x}))\vec{V}_H(\bar{x}) &= -\eta(\vec{V}_R(\bar{x}))\vec{V}_R(\bar{x}) \end{aligned}$$

La función de eficiencia no previene la aparición de estos mínimos locales. Tal y como se comentó, este requisito de  $FN$  no está recogido por las características de  $\eta$ . Es la intervención humana en este sistema es la que asegura su cumplimiento, introduciendo cambios no correlados con la función de navegación del robot en su respuesta  $\vec{V}_H(\bar{x})$  para evitar los mínimos locales.

### 5. Demostración gráfica

Para mostrar cómo funciona  $\eta$ , la representaremos gráficamente mediante isogramas (Fig. 4.4). El isograma muestra mapas de curvas conectando los puntos en que la eficiencia tiene un mismo valor constante. Asignamos los canales rojo, verde y azul del espacio de color

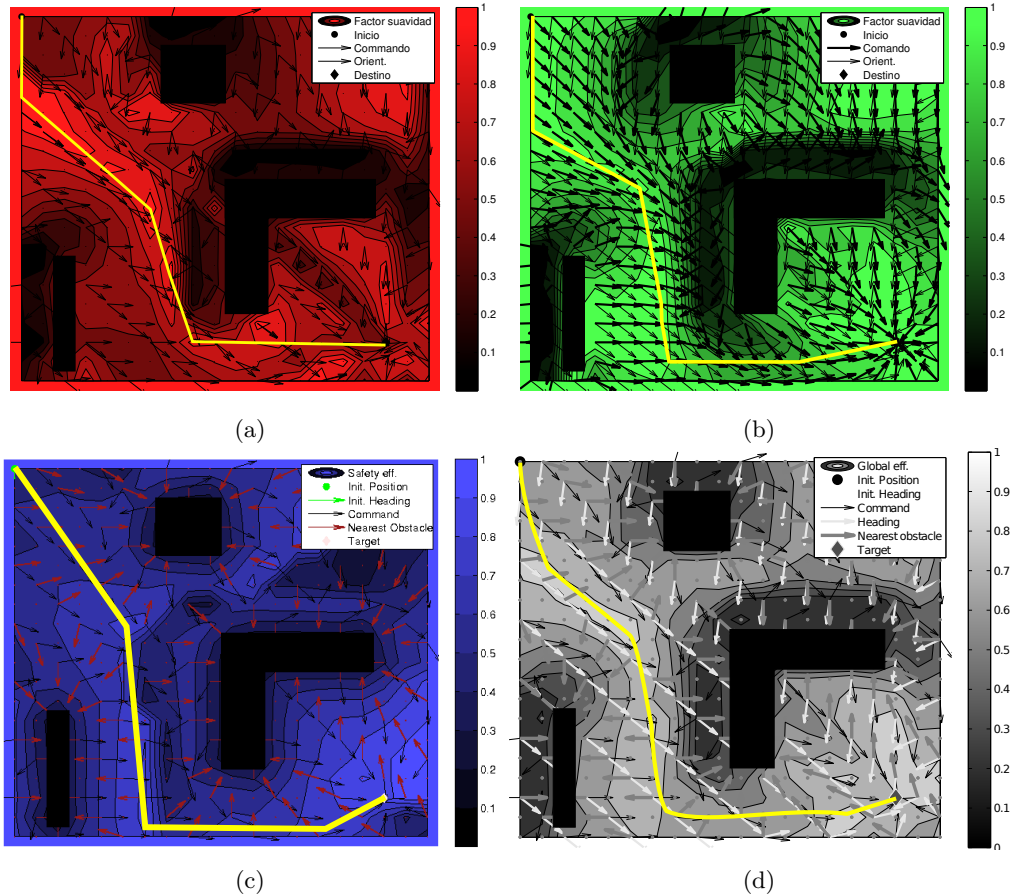


Figura 4.4: Factores de  $\eta$  representados como un mapa RGB: (a) R:  $\eta_{sm}$ , (b) G:  $\eta_{dir}$ , (c) B:  $\eta_{sf}$ , (d) Brillo: Isograma global de  $\eta$ .

*Red-Green-Blue (RGB)* a  $\eta_{sm}$ ,  $\eta_{dir}$  y  $\eta_{sf}$  respectivamente de cada punto del espacio de forma que la combinación de las tres mostrará un color distintivo en *RGB* para evaluar los isogramas combinados a golpe de vista.

Obviamente, áreas con eficiencia similar tendrán colores similares. Estas áreas con características uniformes se darán en torno a obstáculos y puntos relevantes como el destino, de forma similar a un mapa topográfico. Nos permiten evaluar visualmente la dificultad de cualquier trayectoria robótica en términos del color de los puntos del isograma que recorre: una ruta de navegación eficaz en los tres factores sería lo más cercana al blanco posible, un rojo puro indicaría una alta suavidad y un violeta carencia de directividad.

Hay que tener en cuenta que los isogramas son dependientes de los comandos de navegación utilizados. Corresponden a una estrategia de navegación que, aunque está lógicamente afectada por el entorno, no es necesariamente única. Por ejemplo el mapa correspondiente a un algoritmo *PFA* no será el mismo que el correspondiente a un algoritmo *Nearness Diagram (ND)*, incluso para un mismo entorno.

## 5.1. Factores aislados vs. eficiencia conjunta

El isograma de la Fig. 4.4 corresponde al campo en la Fig. 4.1 con los mismos puntos de partida, destino y distribución de obstáculos. En este ejemplo se ha utilizado un algoritmo *PFA* para crear los comandos de navegación. Se han superpuesto dichos comandos, junto con la orientación del robot y el vector normal a los obstáculos para una malla de posiciones en el isograma.

Podemos observar el descenso de  $\eta$  en las proximidades de los obstáculos, como cabría esperar de zonas más inseguras. Es interesante observar que no solo desciende  $\eta_{sf}$ . El algoritmo *PFA* aplicado en la proximidad de obstáculos está sujeto a una fuerte componente de repulsión. Esta componente puede enmascarar la componente de atracción al objetivo, ofreciendo comandos no necesariamente dirigidos hacia el objetivo. Ese fenómeno se aprecia en el resto de factores de eficiencia  $\eta_{dir}$  y  $\eta_{sm}$ . *PFA* nunca acercaría el robot tanto los obstáculos -salvo por una mala calibración-. Este mapa nos permite observar cómo en las inmediaciones de los mismos su funcionamiento no sería el adecuado.

Las Figs. 4.4a-c permiten estudiar de manera independiente los factores de eficiencia del ejemplo.  $\eta_{sm}$  cambia gradualmente a medida que nos aproximamos a los obstáculos. Y es que los comandos *PFA* tienden a oscilar en la proximidad de los obstáculos, reduciendo la suavidad de la trayectoria.  $\eta_{dir}$  sólo se preserva lejos de los obstáculos. A esa distancia las fuerzas de repulsión de los comandos de *PFA* no afectan de igual forma al robot, dejando predominar una fuerza de atracción uniforme y por tanto con alta  $\eta_{dir}$ . Como era de esperar, el factor de seguridad  $\eta_{sf}$  es el más afectado por la distribución de los obstáculos.

La Fig. 4.4d representa el módulo -gráficamente el brillo- de  $\eta$  muestra las trayectorias de mayor eficiencia del algoritmo *PFA*: sin oscilaciones y lejos de los obstáculos.

## 5.2. Isogramas basados en perfil de usuario

Si observamos la superposición de color *RGB* (Fig. 4.5a), podemos apreciar visualmente cuáles de los factores se preservan en el conjunto. Por ejemplo, las áreas azules correspondientes a zonas de baja directividad y suavidad. Una mejora en estos dos últimos parámetros implica un cambio de color hacia un turquesa claro. Y un color naranja claro indica que la directividad cae frente a suavidad y seguridad.

Las zonas claras presentan una mejor eficiencia, y por tanto un comportamiento del *PFA* más cercano a una función de navegación. La eficiencia nos permite compensar cambios abruptos en los comandos de entrada. Este efecto es claramente visible en las Figs. 4.4a-c.

La Fig. 4.5b representa la  $\eta$  de un comando generado mediante una *FN*. Esta figura nos permitirá comparar con otras soluciones de navegación autónoma en la Fig. 4.5 y de control colaborativo en la Fig. 4.6. El isograma de la *FN* nos permitirá evaluar su parecido con el resto de algoritmos de navegación. Los comandos de la *FN* son generados utilizando la ec. 4.15, tal y como fue propuesta en [138].

$$\begin{aligned} \vec{V}_R &= \vec{\nabla} \varphi(\bar{q}) \\ \varphi(\bar{q}) &\equiv \frac{\|\bar{q} - \bar{q}_{goal}\|^2}{[\|\bar{q} - \bar{q}_{goal}\|^2 + 0,1 \beta(\bar{q})]^{(1/2)}} \\ \beta(\bar{q}) &= \prod_{i=1}^M \|\bar{q} - \bar{q}_{obst_j}\|^2 - \rho_{obst_j} \end{aligned} \quad (4.15)$$

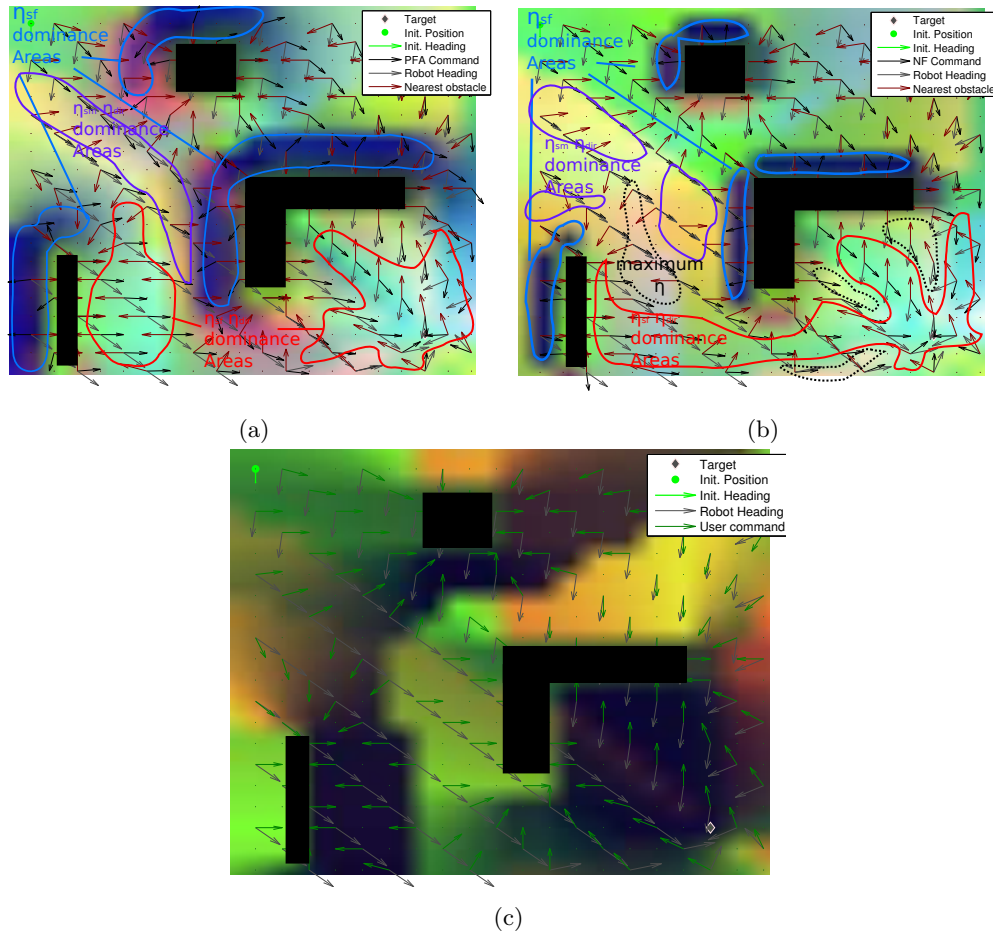


Figura 4.5: Isogramas RGB de  $\eta$  Global de comandos (a) PFA, (b) FN y (c) usuario ineficiente.

Como tercer ejemplo, hemos creado un “*usuario artificial*” en el mismo entorno. Este usuario intenta deliberadamente acercarse al obstáculo más cercano. Hemos representado su isograma en la Fig. 4.5c. Como cabía esperar, es completamente diferente. Es mucho más oscuro que el equivalente para *PFA* (Fig. 4.5a), especialmente cerca de los obstáculos. Es interesante observar que el sistema de representación propuesto permite obtener una idea general de la eficiencia de navegación del usuario a simple vista, simplemente evaluando la componente de iluminación del isograma en media. El isograma del usuario ineficaz constituye una pésima estrategia de navegación, pese a tener una zona más clara en la que su comportamiento es aceptable.

### 5.3. Isogramas de control colaborativo

El control colaborativo permite combinar comandos de usuario y de un algoritmo de navegación para obtener mejores soluciones. Para ilustrarlo hemos representado dicha combinación mediante vectores amarillos en la Fig. 4.6a-b. Los comandos de usuario son proporcionados por el “*usuario artificial*” y los de un *PFA*. Cabe resaltar el hecho de que hemos utilizado el peor caso posible: un usuario que intenta colisionar (Fig. 4.5c). La representación



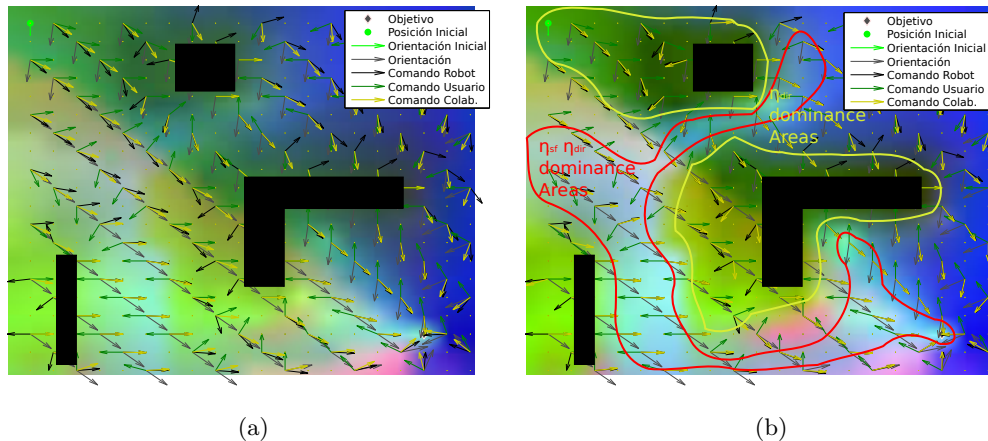


Figura 4.6: Isogramas de  $\eta$  global del comando colaborativo (a) PFA-usuario y (b) modulado PFA-usuario.

de la  $\eta$  del comando colaborativo ya no tiene áreas oscuras, lo que implica una mejora en prácticamente todas las situaciones.

Los comandos proporcionados por el control colaborativo se comportan de un modo más cercano a una  $FN$ , mejorando la navegación. Esta solución posee sin embargo algunas limitaciones:

- Es puramente reactiva: no evitará situaciones potencialmente peligrosas o mantendrá registro de riesgos pasados. Únicamente los evitará utilizando la información disponible en un instante concreto.
- Los comandos de usuario no tienen una especial predominancia sobre los robóticos y viceversa: los comandos de usuario y robot siempre tendrán un impacto relativo. Sería útil permitir al usuario un mayor control cuando navegue de manera especialmente eficaz, para evitar frustración y recompensar su esfuerzo.

Los comandos de usuario son particularmente difíciles de predecir, más si tenemos en cuenta que hablamos de personas con diferentes diversidades funcionales. El entorno es dinámico, dificultando su identificación y por consiguiente, la reacción del usuario. Sin embargo, podemos predecir hasta cierto punto la eficiencia del usuario en un entorno si estudiamos cómo se ha conducido desde el último cambio significativo. De esta manera podemos proporcionar un poco de inercia al control colaborativo, reduciendo el impacto de los comandos de usuario ineficientes. Así aproximaremos mejor una  $FN$  y solventaremos las limitaciones indicadas. La próxima sección tratará sobre la modulación de control cuando el usuario presenta una baja  $\eta$ .

## 6. Control colaborativo modulado

La sección anterior presentó las limitaciones de una aproximación puramente reactiva a la combinación de comandos de usuario y robóticos. Esta sección mostrará como mejorar esta combinación. Introduciremos un nuevo factor  $K$  en la ecuación 4.2 para modular la ratio de control usuario-computador. Este factor actúa como una *envolvente* que proporciona una inercia dependiente de la eficiencia. Así, usuarios que conducen eficientemente a lo largo de una zona,

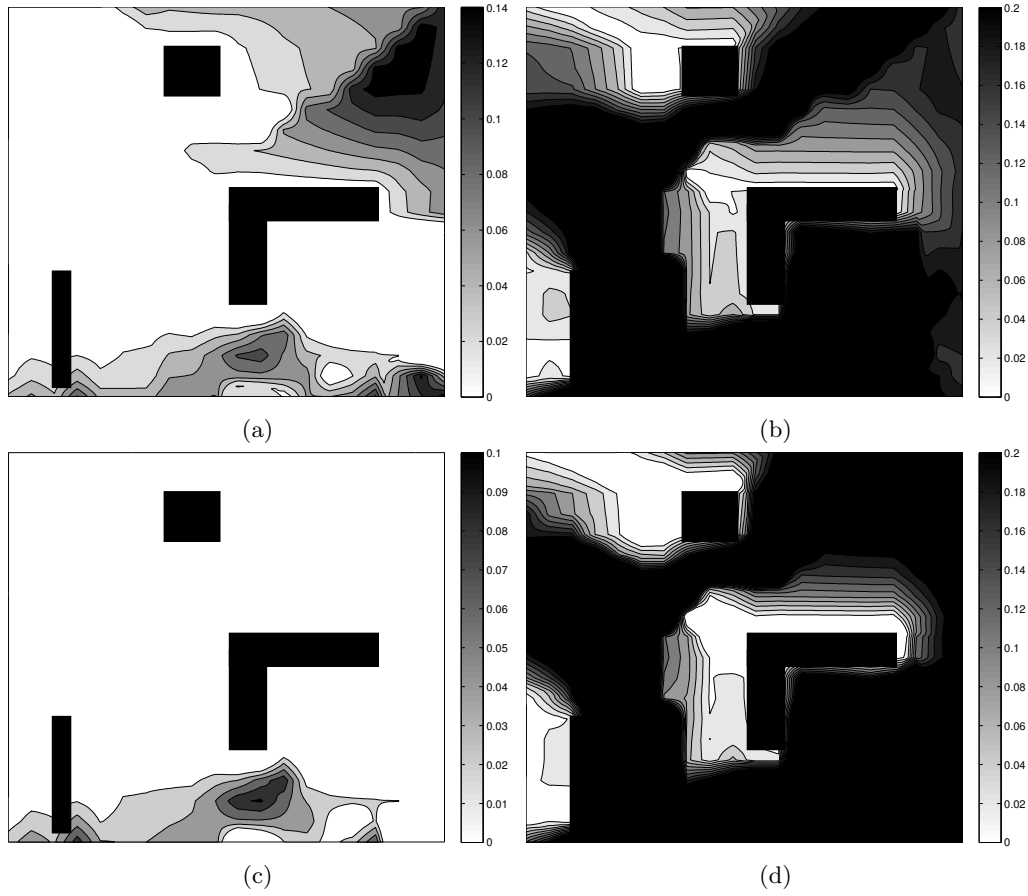


Figura 4.7: diferencia de  $\eta$  entre: (a) control colaborativo y usuario eficiente, (b) control colaborativo y usuario peligroso, (c) control colaborativo modulado y usuario eficiente, (d) control colaborativo modulado y usuario peligroso

recibirán mayor control a pesar de errores puntuales. Un concepto similar fue introducido en [60] para incluir información biométrica en el control colaborativo. El factor de modulación  $K$  depende ahora del promedio de  $\eta_H$  en un intervalo temporal reciente. El inicio del intervalo de tiempo se fija en el último cambio abrupto de  $\eta_H$ , para tener en cuenta que ciertas personas pueden conducir de forma diferente en entornos específicos dependiendo de su diversidad funcional concreta. Valores altos de  $\bar{\eta}_H$  proporcionarán valores altos de  $K$ . Los comandos de control colaborativo se generarán ahora utilizando la ecuación 4.16.

$$\vec{V}_C = (1 - K(\bar{\eta}_H)) \eta_R \vec{V}_R + K(\bar{\eta}_H) \eta_H \vec{V}_H \quad (4.16)$$

$K$  es una función escalon discreta que depende de  $\bar{\eta}$ .

$$K(\eta) = \begin{cases} K_1 & \text{if } \bar{\eta} \leq C_1, \\ K_2 & \text{if } \bar{\eta} > C_1 \ \& \ \bar{\eta} \leq C_2, \\ \dots & \\ K_n & \text{if } \bar{\eta} > C_{n-1} \ \& \ \bar{\eta} \leq C_n, \end{cases} \quad (4.17)$$

A más desciende el rendimiento del usuario, más asistencia es proporcionada. Según el modelo *Press-Competence Model (PCM)* de [38], los usuarios estarían más dispuestos a aceptar esta aproximación al evitar cambios bruscos de control. Sólo damos más control al robot cuando el usuario se comporta de forma claramente ineficiente y viceversa. El usuario será recompensado con más control cuando mantenga una conducción adecuada. Esta inercia pretende absorber fallos puntuales y enfocarse a tendencias a lo largo de áreas. Además, los usuarios perciben esta modulación como un mayor grado de control en el tiempo.

$i$	1	2	3	4
$\bar{\eta}_H i$	0.2	0.3	0.4	0.5
$K_i$	0.3	0.4	0.5	0.7

Tabla 4.1: Intervalos de  $K$  y valores correspondientes de  $\bar{\eta}_H$

Nuestra primera propuesta para la función  $K(\bar{\eta}_H)$  fue una proporcionalidad directa. Sin embargo, nos aconsejaron utilizar un conjunto discreto de valores y evitar una excesiva variación de control. Por lo tanto, definimos cuatro casos: I) peligro, II) mal rendimiento, III) en promedio, IV) buen rendimiento. Utilizamos datos de experimentos previos de control compartido [69] e identificamos estos casos como: I) pruebas sin finalizar, II) pruebas de bajo rendimiento, III) pruebas en promedio, IV) pruebas con sujetos sanos. Así que tomamos como  $\bar{\eta}_H i$  el valor medio de  $\eta_H$  en cada caso identificado. La tabla 4.1 recoge estos valores. Para ilustrar su efecto, hemos recalculado la función de la Fig. 4.6a según este nuevo paradigma y representado los comandos emergentes en la Fig. 4.6b.

Hemos comparado los comandos emergentes con diferentes técnicas de navegación autónoma. Las Figs. 4.5a-b muestran el mapa de  $\eta$  para *PFA* y *FN*. Los comandos proporcionados por *FN* son evidentemente más eficientes que los proporcionados por *PFA*. El mapa correspondiente a los comandos colaborativos modulados (Fig. 4.5b) es más pálido. Esto significa que es más equilibrado en los tres factores, acercándose al blanco. Las áreas azules indican una predominancia de  $\eta_{sf}$  sobre otros factores. Es decir, la directividad y suavidad no están tan bien preservadas como la seguridad de los comandos. Pueden existir otras zonas con mayor seguridad, pero no se aprecia tan claramente como aquí, al carecer de otros factores. Los comandos en zonas inseguras (cerca de obstáculos, apuntando a obstáculos) tendrán típicamente este color. Este tipo de zonas no es tan común en el mapa de *FN*. La mejor esquivada de obstáculos de *FN* sobre *PFA* garantiza mayores  $\eta_{sm}$  y  $\eta_{dir}$ .

Los comandos emergentes son, en ambos casos, más similares a *FN*. Podemos observar cómo

Comando de navegación	Diferencia de $\eta$ (%)				Diferencia de ángulo ( $^\circ$ ) entre comandos (promedio)	
	$\eta_{sm}$	$\eta_{dir}$	$\eta_{sf}$	$\eta$	Media	Desv.
Usuario ineficiente autónomo	22.54	37.93	28.73	29.46	-10.75	113.42
PFA autónomo	4.13	10.51	-3.30	3.78	-0.84	46.33
Control colaborativo	18.64	20.30	0.12	12.92	-1.62	50.24
Control colaborativo modulado	15.49	18.13	-3.53	9.98	3.74	46.68

Tabla 4.2: Similitud comandos de navegación con *FN*

los mapas de  $\eta$  en la Fig. 4.6b tienen menos áreas azules. Por contra, son mayormente verde y cian. Este color indica un incremento de  $\eta_{dir}$ . Tal y como indicábamos, las situaciones peligrosas son prevenidas con más antelación.

Se aprecia también un mayor brillo en el comando emergente modulado que en el no modulado (Fig. 4.6a). Esto indica que los tres factores tienen mayores valores. Nuestra función de control colaborativo modulado aproxima mejor una  $FN$ , tal y como muestra la mayor similitud entre sus isogramas. Y además, proporciona más control a los usuarios eficientes.

Vamos a utilizar también los isogramas para comparar la cantidad de ayuda que proporciona el control colaborativo. Representaremos la cantidad de ayuda por el incremento de  $\eta$  entre navegar de forma autónoma y utilizando el control colaborativo. La Fig. 4.7 muestra los casos de dos usuarios al utilizar las dos variantes de control colaborativo presentadas. El primer usuario utilizado es un usuario eficiente: siempre se dirige hacia el objetivo. El segundo siempre apunta hacia los obstáculos. Sus comandos de usuario servirán de entrada para las ecuaciones de control colaborativo ec. 4.2 y ec. 4.16.

Finalmente obtenemos cuatro casos: I) usuario eficiente con control colaborativo (Fig. 4.7a), II) usuario ineficiente con control colaborativo (Fig. 4.7b), III) usuario eficiente con control colaborativo modulado (Fig. 4.7c) IV) usuario ineficiente con control colaborativo modulado (Fig. 4.7d).

Las áreas oscuras corresponden a grandes diferencias, esto es, alta intervención del sistema. Podemos observar cómo el control colaborativo modulado se adapta mejor a las necesidades del usuario:

- Interviene menos en el caso de un usuario eficiente (Fig. 4.7c), ya que necesita menos ayuda.
- El mismo usuario en el control colaborativo recibe más intervención del sistema (Fig. 4.7a) en áreas no críticas. Esto es percibido negativamente por el usuario, tal y como se vio en [69].
- Interviene aún más en el usuario ineficiente (Fig. 4.7d) de lo que ya hace el control colaborativo (Fig. 4.7b)

La Tabla 4.2 presenta otra comparativa de diferentes algoritmos con  $FN$ . Recoge la diferencia de  $\eta$  entre el usuario ineficaz, el  $PFA$ , el control colaborativo y  $FN$ .

Existe una gran diferencia entre el usuario ineficaz simulado y la  $FN$ . Esto era de esperar, ya que buscamos establecer una cota inferior con el usuario ineficaz.  $PFA$  es muy cercano a  $FN$  en términos de eficiencia, incluso mejor en seguridad. Y es que ambas son técnicas de optimización emparentadas. Sin embargo  $PFA$  posee giros más abruptos en la proximidad de los obstáculos, lo que le resta directividad.

Combinamos el usuario ineficaz con  $PFA$  utilizando control colaborativo. Los comandos obtenidos mejoran en gran medida al usuario autónomo. Y más importante, la seguridad es uno de los factores más incrementados.

La última fila muestra la combinación del usuario y  $PFA$  utilizando el control colaborativo modulado. Este es un algoritmo que permite más flexibilidad que el anterior. Existe una mejora con respecto al control colaborativo normal, aproximándonos más a una  $FN$ .

La Tabla 4.2 también proporciona estadísticas de la diferencia de ángulo del comando. Podemos observar como el usuario ineficaz proporciona comandos erráticos, con gran desviación. Los comandos de  $PFA$  son muy similares a los de una  $FN$ . El control colaborativo combina estas dos fuentes de información. El comando colaborativo conserva la similitud con el proporcionado por una  $FN$  (menos de dos grados de diferencia y casi la misma desviación) incluso con la intervención del usuario. Puede parecer que el control colaborativo modulado es menos preciso por su mayor ángulo de diferencia. Sin embargo, esta diferencia es más estable, proporciona

comandos más coherentes (como indica su menor desviación). Son por lo tanto más estables en su grado similitud.

## 7. Experimentos y resultados

Para demostrar el impacto de la capa reactiva propuesta en la navegación se va a comprobar cómo afecta la ayuda proporcionada a los mismos usuarios que presentamos en las pruebas de la capa deliberada. En este caso se va a trabajar con la trayectoria compleja en Casa Agevole que ya se presentó en el capítulo de perfilado (Fig. 2.2). El equipo de trabajo consideró que dicha trayectoria incluía la mayoría de las maniobras que un usuario emplea para desplazarse por la vivienda con su vehículo.

Los isogramas presentados en este capítulo, nos permiten estimar cómo será la ayuda prestada al usuario. La figura 4.8 muestra la eficiencia esperada de los comandos proporcionados por el PFA. Podemos observar cómo los pasillos suponen áreas complejas en las que la eficiencia cae abruptamente, por la proximidad de los obstáculos. Las áreas más claras y con menores caídas se encuentran en el salón, como era de esperar. Supone por tanto un escenario relevante a priori para su estudio.

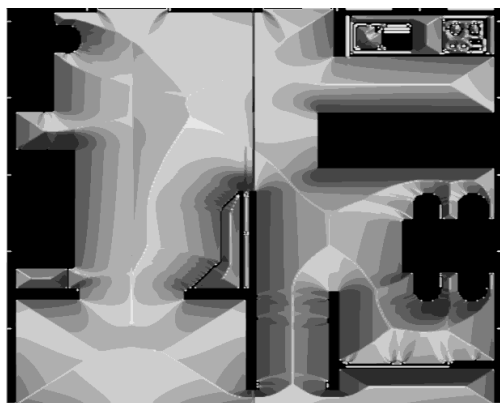


Figura 4.8: Isograma de la  $\eta$  del PFA en las ruta propuesta

Todas las pruebas se han efectuado de tres formas: conducción autónoma, control colaborativo original y control colaborativo modulado adaptado al perfil del conductor.

Cabe repetir una vez más que el objetivo del sistema de control propuesto no es incrementar la eficiencia todo lo posible, sino sólo lo necesario para alcanzar lo que se ha establecido como estándar. Cuanto menor sea la cantidad de ayuda que permita alcanzar la eficiencia deseada, mejor estará funcionando el sistema, ya que el usuario estará operando más por si solo.

La Fig. 4.9 muestra el tiempo y la distancia que cada usuario empleó en completar la trayectoria en los distintos modos de control. Como puede observarse, no hay grandes diferencias en la distancia recorrida, en tanto que el espacio de maniobra en la casa es reducido: excepto el usuario 906 (hemiplejía izquierda, MMSE alto, Barthel medio), que reduce la distancia significativamente al recibir ayuda modulada, el resto se mantiene aproximadamente igual. Es mucho más ilustrativo observar los tiempos empleados para concluir la trayectoria, que se reducen significativamente en todos los casos -incluido el prototipo- al recibir ayuda. Hay que indicar que siguen sin percibirse grandes diferencias entre los dos modos de control colaborativo en este aspecto. Lo que si es interesante es que los tiempos en modo asistido se igualan para los distintos usuarios, registrándose variaciones menores que en modo autónomo.

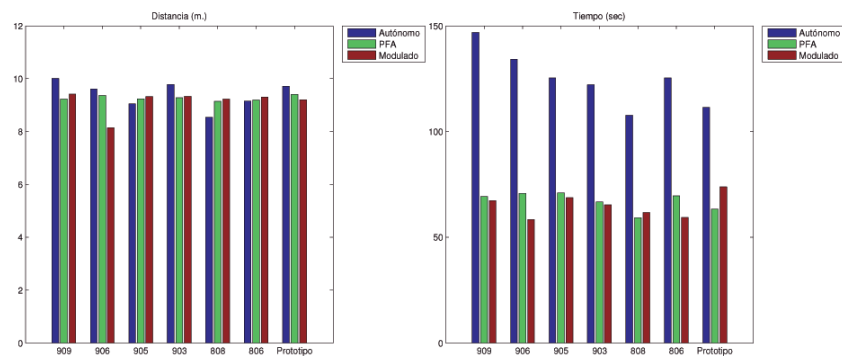


Figura 4.9: Tiempo y distancia para todos los usuarios

La Fig. 4.10 muestra la eficiencia media y varianza, junto al desacuerdo, de todos los usuarios en los tres modos de control testados. En tanto que todos los usuarios seleccionados son capaces de concluir la trayectoria compleja propuesta, el incremento de eficiencia no es excesivo en ningún caso, si bien se aprecia mejoría en todos los usuarios del modo autónomo al modo asistido convencional y, en la mayoría de los casos, en modo adaptado. Cabe indicar que el control colaborativo adaptado busca dar menos ayuda y concentrarla sólo en áreas puntuales donde es necesaria, por lo que es razonable que en ocasiones la eficiencia resultante sea ligeramente inferior que en el caso del control colaborativo tradicional. Esto se refleja también en la mayor varianza de la eficiencia en este modo. Por los mismos motivos, el desacuerdo disminuye habitualmente en el caso del control adaptado, ya que el resultado se asemeja más a la forma de conducir del usuario en si. Puede observarse que siempre aparece un desacuerdo residual -que responde a que ningún vehículo responde de forma inmediata y perfecta a los comandos del usuario- que crece enormemente al pasar a control asistido y se reduce al modular la ayuda. Cabe indicar que en el caso de los usuarios 905 y 903 este índice se incrementa. Coincide con que se trata de los dos usuarios que presentan peor condición física, lo que hace que su control del vehículo sea inferior, no necesariamente por rechazo a la ayuda, sino por falta de capacidad para manipular mejor el joystick. A través de todas nuestras pruebas se ha comprobado que, de hecho, el desacuerdo no es representativo como métrica cognitiva en caso de discapacidad física marcada.

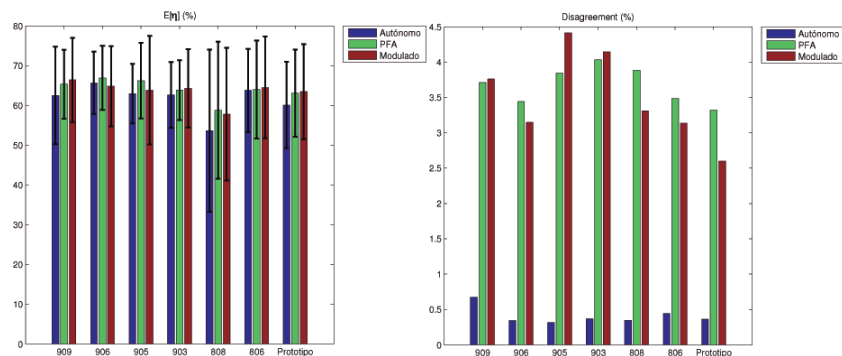


Figura 4.10: Eficiencia media y desacuerdo para todos los usuarios

Por último, la Fig. 4.11 muestra la cantidad de control de cada usuario en los distintos modos. Evidentemente, cualquier modo de control compartido reduce la cantidad de control

del usuario. La figura muestra, en cualquier caso, varios puntos de interés. Para empezar, y como se ha señalado en varias ocasiones, el sistema propuesto tiende a igualar a los usuarios independientemente de su condición. Además, en general el control adaptativo permite al usuario retener una mayor cantidad de control: los únicos casos en que esto no ocurre son los usuarios 806 y 906, ambos con un Barthel medio. En este caso el control adaptado reduce ligeramente la cantidad de control que proporcionaba el control adaptativo convencional, si bien este hecho puede responder a una necesidad mayor de ayuda. También es significativo el incremento de varianza en la cantidad de ayuda en el modo adaptativo, que demuestra que, de hecho, se está acomodando a las necesidades particulares de cada individuo.

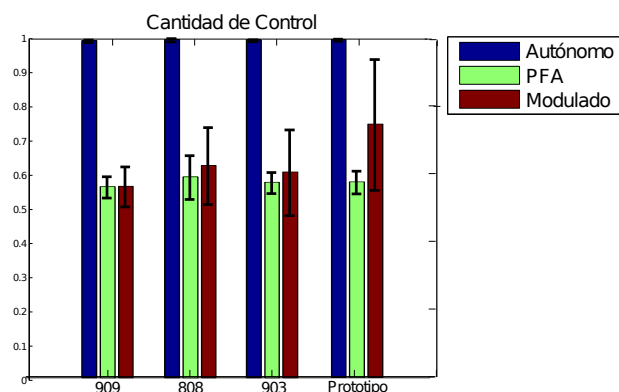


Figura 4.11: Cantidad de control para todos los usuarios

Las ventajas del control colaborativo se aprecian mejor localmente. Para ello se analizaran en profundidad los casos de los usuarios 808, 903 y 909 que ya se usaron como ejemplo en el capítulo anterior. En general, puede observarse en la Fig. 4.12 como las trayectorias asistidas son más suaves y presentan menos oscilaciones. La forma de enfilar el pasillo inicial y tomar el giro en U se asemejan más a la trayectoria del usuario estándar en este caso, si bien se mejora la aproximación a la puerta según el usuario, ya que cabe recordar que el estándar nunca suele devolver una ruta perfecta.

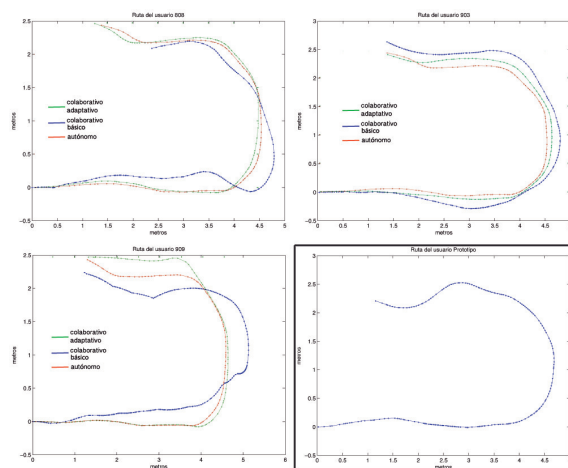


Figura 4.12: Trayectorias en los distintos modos de control para los usuarios 808, 903 y 909

La Fig. 4.13 muestra la ayuda proporcionada a los distintos usuarios en el modo colaborativo básico y en el adaptativo. Cabe resaltar que, tal como ya se había previsto, la cantidad de ayuda media proporcionada en el modo adaptativo es inferior, tal como se deseaba. También puede observarse que los picos se hacen más pronunciados -es decir, se presta más o menos ayuda de forma puntual- y más anchos -es decir, la ayuda se concentra en zonas-. La conclusión principal que se extrae es que el control colaborativo adaptativo permite ajustar mejor la ayuda a las capacidades del usuario, aportando cierta inercia en función de la dificultad con que manejan cada situación. En tanto que, en general, la cantidad media de ayuda disminuye, se considera que se alcanza el objetivo de ayudar en la menor medida posible de cara a evitar la pérdida de capacidades residuales. En tanto que la ayuda se proporciona en mayor cuantía en las zonas donde más se necesita, se considera que se refuerza adecuadamente la autonomía del usuario de acuerdo a su potencial. Además, al modularse la ayuda en función de las capacidades del usuario, tal como muestra el desacuerdo, se considera que la aceptación de la ayuda se mejora y, por tanto, se reduce el estrés y la frustración. A modo de resumen, se recogen en la Tabla 4.3 los valores promedio de las métricas analizadas.

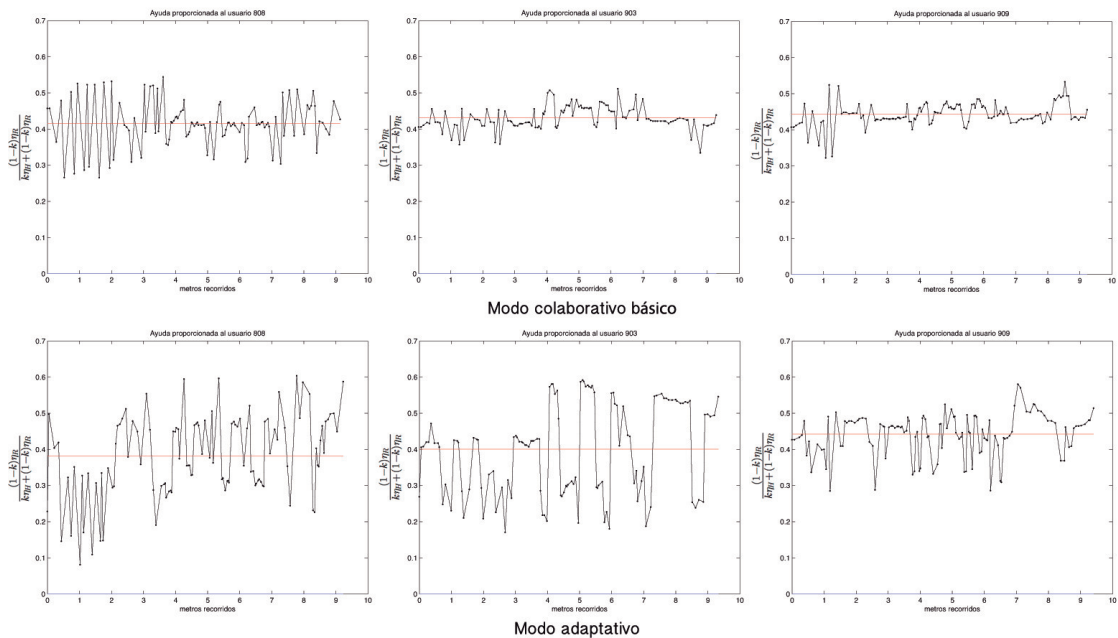


Figura 4.13: Trayectorias en los distintos modos de control para los usuarios 808, 903 y 909



		909	808	903	Prototipo
Autónomo	$E[\eta]$ (%)	62.4	53.6	62.5	60.1
	Tiempo (sec)	146.8	107.7	122.1	111.4
	Distancia (m.)	10.0	8.5	9.7	9.7
	Disagreement	0.67	0.34	0.37	0.36
	Cantidad de Control	0.98	0.98	0.98	0.98
	mmse con Prototipo	0.19	0.16	0.16	x
Colaborativo	$E[\eta]$ (%)	65.3	58.7	63.8	63.0
	Tiempo (sec)	69.3	59.2	66.7	63.3
	Distancia (m.)	9.2	9.1	9.2	9.4
	Disagreement	3.71	3.88	4.03	3.32
	Cantidad de Control	0.55	0.58	0.56	0.56
	mmse con Prototipo	0.04	0.04	0.05	x
Adaptativo	$E[\eta]$ (%)	66.3	57.7	64.2	63.4
	Tiempo (sec)	67.3	61.7	65.3	73.8
	Distancia (m.)	9.4	9.2	9.3	9.1
	Disagreement	3.76	3.31	4.14	2.59
	Cantidad de Control	0.55	0.61	0.59	0.73
	mmse con Prototipo	0.09	0.05	0.08	x

Tabla 4.3: Resultados

## 8. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la capa reactiva de la arquitectura de control propuesta. La capa desarrollada se acoge al paradigma del control compartido, más específicamente al control colaborativo, que se caracteriza porque usuario y robot contribuyen al control simultáneamente y en todo momento. Se ha presentado una metodología para acercar el control compartido a una *FN* intentando preservar en la medida de lo posible las propiedades de éstas -puesto que ofrecen una solución única y óptima al problema de la navegación- en presencia de una fuente externa de comandos. Cada comando emergente se obtiene a partir de la suma vectorial del comando proporcionado por el usuario a través del joystick y del que devuelve el algoritmo de navegación autónoma empleado por el robot, ambos pesados por su respectiva eficiencia local. Dicha eficiencia se obtiene a partir de las propiedades de una *FN*: suavidad, directividad y seguridad. De esta forma el comando emergente tratará de cumplir lo mas posible las propiedades de una *FN*.

Mediante este procedimiento la cantidad de ayuda se adecua a las acciones del usuario en cada momento, pero de cara a ajustarla a su perfil de capacidad, obtenido tal como se propuso en el capítulo de perfilado, se propone además modular la ecuación por un factor que depende en todo momento de la diferencia de eficiencia entre el usuario prototipo y el actual a la hora de resolver la situación en que se encuentra.

Esta modulación proporciona estabilidad, permite reducir la cantidad de ayuda proporcionada, en general y en las situaciones en que no es necesaria, y, al mismo tiempo, incrementa ésta de forma puntual en las situaciones en que más se necesita. En conclusión, la capa propuesta intenta asemejarse en propiedades a una función de navegación y permite personalizar la ayuda de forma reactiva a las necesidades de cada usuario. Al combinarse con la capa deliberada propuesta, que ya se encargaba de proporcionar caminos personalizados a dichas necesidades, se consigue el objetivo de facilitar la navegación de cualquier persona para llevar a cabo sus actividades diarias, al tiempo que se proporciona la menor ayuda posible, dando al usuario mayor control sobre su movilidad.

Hemos presentado una herramienta gráfica para representar  $\eta$  mediante isogramas y así poder apreciar globalmente el parecido de un sistema de navegación cualquiera - incluyendo el mismo control compartido - en un entorno determinado. Cabe resaltar que los isogramas prueban que desde el punto de vista de la navegación el entorno no es algo estático, sino que depende totalmente del punto de vista del móvil, ya sea este un robot, un humano, o un sistema que combina ambos. Esto refuerza la línea argumental de esta tesis de que todo el proceso de navegación es subjetivo y debe estar subyugado a las habilidades específicas de cada usuario.

Empleando los isogramas propuestos se ha mostrado cómo el control colaborativo mejora al usuario en cuanto a parecido a una *FN* siempre en función de sus necesidades. Además, también se ha probado cómo el parecido con una *FN* puede ser mejorado mediante la modulación, que ofrece inercia temporal frente a los cambios inmediatos que genera una función reactiva pura.

En conjunto, cabe resaltar que el control colaborativo modulado preserva el predominio humano en navegación, reasignando el control sólo en situaciones críticas. Y esto manteniendo el rendimiento en promedio.

## Experimentación y resultados

“  
*Knowledge brings fear*  
”  
*Futurama*

### 1. Descripción de la prueba

En el presente capítulo se presenta un experimento con el sistema de navegación completo integrado.

Por coherencia, se trabajará con los mismos usuarios de los capítulos anteriores. El objetivo de la prueba es evaluar hasta qué punto contribuye cada capa del sistema propuesto a adaptar la ayuda a las necesidades de los distintos usuarios. Cabe mencionar una vez más que el objetivo es proporcionar la menor cantidad de ayuda posible que permita al usuario completar de forma adecuada -no necesariamente óptima- la tarea de navegación asignada, al tiempo que se trata de maximizar la aceptación de la ayuda y reducir la posible frustración del conductor.

En este caso, la prueba se llevará a cabo en un ala del Hospedale Santa Lucia (Roma), ya que un entorno más reducido como la Casa Agevole no permite tantas alternativas para el planificador como para que aparezcan alternativas viables al camino físicamente más corto. La prueba consistirá en salir de una habitación y navegar hasta alcanzar un segundo espacio en el lado opuesto a la primera. Tal como se ha comentado con anterioridad, el sistema funciona de forma híbrida y asíncrona. La capa deliberada propuesta se encarga de calcular el camino más adecuado de acuerdo al perfil de discapacidad obtenido para cada usuario desde el punto en que éste se encuentra hasta el objetivo deseado. La salida de esa capa es una secuencia de objetivos parciales -coincidentes con los puntos de máxima curvatura del mejor camino tentativo para el usuario en cuestión- que se alimentan en orden a la capa reactiva propuesta. Dicha capa se encarga de alcanzar el objetivo parcial activo de acuerdo a su propia algoritmia, es decir, sin prestar atención al camino tentativo de la capa deliberada más allá de la ubicación de los objetivos parciales.

En total, se han efectuado las siguientes pruebas:

- Modo autónomo: se concede el control absoluto al usuario, sin aportarle ningún tipo de ayuda

- Modo colaborativo: se ofrece ayuda únicamente a nivel reactivo, usando el modelo de control colaborativo básico basado en PFA
- Modo adaptativo: se ofrece ayuda a nivel reactivo, pero empleando el perfil del usuario para modular la aportación de éste al control colaborativo
- Modo óptimo: se ofrece ayuda a nivel deliberativo y reactivo, en este segundo caso de acuerdo al paradigma adaptativo

La tabla 5.1 resume los resultados de todas las pruebas, que se comentan en detalle en el apartado siguiente. Hay que resaltar que la cantidad de control ni siquiera en modo autónomo es del 100 %, ya que siempre se mantiene una capa de salvaguarda activa que detiene la silla en caso de que el comando propuesto lleve a una colisión inminente.

Prueba	Usuario	909	808	903	Prototipo
Autónomo	E[ $\eta$ ] (%)	66.995	50.730 <sup>1</sup>	61.373 <sup>1</sup>	60.835
	Tiempo (sec)	351.048	117.697	97.121	355.200
	Distancia (m.)	25.271	6.587	6.454	27.801
	Disagreement	0.778	0.432	0.370	0.478
	Cantidad de Control	0.982	0.984	0.983	0.983
	mmse con Prototipo	0.165	0.139	0.326	x
Colaborativo	E[ $\eta$ ] (%)	66.124	57.154	62.082	62.929
	Tiempo (sec)	220.297	369.405	237.297	255.680
	Distancia (m.)	27.271	27.131	27.237	29.194
	Disagreement	5.614	3.386	3.336	4.711
	Cantidad de Control	0.548	0.595	0.562	0.554
	mmse con Prototipo	0.111	0.121	0.112	x
Adaptativo	E[ $\eta$ ] (%)	64.794	57.749	63.063	63.834
	Tiempo (sec)	208.000	199.831	257.536	275.800
	Distancia (m.)	27.453	27.203	27.151	27.871
	Disagreement	5.470	3.316	3.570	3.838
	Cantidad de Control	0.556	0.619	0.630	0.723
	mmse con Prototipo	0.078	0.181	0.210	x
Óptimo	E[ $\eta$ ] (%)	66.627	57.664	65.264	67.277
	Tiempo (sec)	171.093	189.043	181.230	199.461
	Distancia (m.)	24.197	24.881	23.978	24.012
	Disagreement	4.965	4.111	3.599	4.437
	Cantidad de Control	0.569	0.638	0.609	0.642
	mmse con Prototipo	0.115	0.182	0.140	x

Tabla 5.1: Resultados

<sup>1</sup>No pudieron completar la ruta en este modo

## 2. Resultados y discusión

Para poder evaluar comparativamente los resultados de los distintos usuarios, se procedió a efectuar todas las pruebas con el usuario prototipo además de con los ya mencionados (808, 909 y 903). La Fig. 5.1d muestra las trayectorias efectuadas por el usuario prototipo en modo autónomo, colaborativo, adaptativo y óptimo. Lo primero que cabe resaltar es que, al igual que ocurre con los otros usuarios, el camino autónomo y los reactivos son diferentes del óptimo gracias a la influencia de la capa deliberada. Mientras que los sistemas reactivos empiezan por salir al pasillo y tratan de cruzar lo antes posible al lado opuesto, atravesando una zona estrecha, de acuerdo a las habilidades del usuario, el sistema deliberado estima como mejor opción pasar a la habitación contigua y atravesar el corredor por una zona más ancha. En modo autónomo, el prototipo presenta una eficiencia media del 60.835 %. En general, cabe destacar que sus resultados son similares, si bien ligeramente inferiores, a los del usuario 909 en modo autónomo: la diferencia entre ambas trayectorias es de sólo 0.165. Los usuarios 808 y 903 no se pueden comparar en este modo con el resto, dado que ninguno de los dos es capaz de completar la trayectoria de forma autónoma (Figs. 5.1.a y b).



Figura 5.1: Trayectorias de los usuarios 808, 903 y 909 en los diferentes modos

El control colaborativo básico ya permite a todos los usuarios alcanzar el objetivo deseado con una eficiencia cercana al prototipo en modo autónomo. De forma global, podría considerarse que la ayuda no favorece al usuario 909, ya que su eficiencia pasa del 66.995 % al 66.124 %, ligeramente inferior. Sin embargo, es inmediato constatar que donde antes necesitó 351.048 segundos para completar la trayectoria, ahora sólo requiere 220.297 segundos. Este cambio revierte en una conducción más ágil y reduce la frustración, si bien el desacuerdo crece hasta un 5.614 con respecto al modo autónomo (desacuerdo residual). Es evidente que la silla no siempre responde a los comandos del usuario en este modo, lo que también se refleja en que su cantidad de control ha bajado a 0.548. La modulación mejora ligeramente estos valores, reduciendo aún más el tiempo de llegada al objetivo y mejorando el desacuerdo y la cantidad de control, si bien no excesivamente. La diferencia de la trayectoria del usuario 909 con el prototipo pasa a ser casi residual: 0.078. Todo esto lleva a considerar que, de hecho, este usuario está muy cerca de lo que se ha catalogado como usuario prototipo en cuanto a habilidades. Si se observan los resultados de los usuarios 808 y 903, lo más notable es que en cualquier modo con ayuda consiguen concluir la tarea asignada. En el caso del usuario 808, su eficiencia es inferior a la media en todos los modos, si bien suficiente para su objetivo. El usuario 903, sin embargo, presenta una eficiencia media igual o superior al prototipo, por lo que cabe concluir que su problema son situaciones puntuales o, lo que es lo mismo, necesitará ayuda de forma puntual. En tanto que el usuario que más ayuda parece necesitar es el 808, éste es también el que más se beneficia de la modulación, en tanto que le permite obtener una cantidad de ayuda muy superior de forma continua en las situaciones en que le hace falta. Cuando la ayuda no está modulada, le sigue costando esfuerzo salir de determinadas situaciones, como evidencia el hecho de que el tiempo de trayectoria en ese modo sigue siendo elevado: 369.405 segundos frente a los 220-240 de los otros usuarios. El desacuerdo para estos usuarios es inferior que para el 909: alrededor de 3.3 en ambos casos, indicando que aceptan mejor la ayuda ofrecida. En modo modulado, 808 pasa a ejecutar la trayectoria en sólo 199.831 segundos, mejorando a los demás usuarios a pesar de que la longitud de los caminos resultantes es similar en todos los casos. Resulta más interesante notar que tanto 808 como 903 retienen más control en modo adaptativo, es decir se les ayuda menos en media, pero más cuando resulta necesario de acuerdo a sus habilidades.

El modo óptimo devuelve los mejores resultados para todos los usuarios, si bien no necesariamente en eficiencia media, dado que, cómo se ha repetido con frecuencia, el sistema no busca optimizar ésta, si en cuanto a tiempos y distancias recorridas. La influencia de la capa deliberada resulta clave para buscar el camino más adecuado para cada usuario de acuerdo a sus capacidades, que no coincide con lo que un sistema sin planificador hubiese intentado. Todos los usuarios pasan a terminar en tiempos inferiores a 200 segundos, con distancias inferiores a 25 metros. El desacuerdo también se reduce en general, ya que el camino busca evitar situaciones que resultan particularmente complejas de resolver a los usuarios en cuestión: estas situaciones suelen ser precisamente las que elevan el desacuerdo en la mayoría de los casos. La cantidad de control se mantiene similar al control adaptativo, como era de esperar, ya que en última instancia lo que se emplea es control adaptativo para la navegación local. Cualquier diferencia puntual puede explicarse por circunstancias puntuales durante la ejecución de la trayectoria más que por la influencia de la capa deliberada.

Los resultados comentados pueden apreciarse en resumen en la Fig. 5.2. Tal como puede observarse en la Fig. 5.2a, las eficiencia media de los usuarios se incrementa visiblemente en el caso de 808 y 903, manteniéndose aproximadamente al mismo valor para 909, en los distintos modos de control. En general, el modo óptimo es el que devuelve mejores resultados en todos los casos, ya que busca los caminos menos dificultosos y en ellos adapta la ayuda al perfil de cada usuario de forma reactiva. Suele también ser habitual que la varianza de la eficiencia sea mayor en los dos modos adaptativos (con y sin capa deliberada) en tanto que, como se ha comentado,

en estos casos la ayuda se adapta mucho más al perfil del usuario por zonas. Este efecto es más apreciable para los usuarios 909 y 808. La varianza puede verse reducida en modo óptimo, ya que se evitan a propósito las zonas en que sería necesaria más ayuda.

De forma análoga, la Fig. 5.2b muestra cómo, al adaptar más la ayuda a las necesidades de cada usuario, se tiende a incrementar la cantidad de control que retienen durante el proceso. En este caso, al variar significativamente la trayectoria en el caso de control óptimo, los resultados no son equiparables, ya que las necesidades del usuario cambian de una situación a otra, lo que explica el decremento de control que experimenta en dicho modo el usuario 903 (al igual que haría el prototipo si le ofreciéramos la ayuda equivalente). En este caso resulta aún más notable el aumento de la varianza en cuanto a cantidad de control cuando éste se adapta más a las necesidades del usuario. Puede observarse que en modo colaborativo la varianza es similar en todos los casos y crece y se diferencia de uno a otro al pasar a los dos modos adaptativos.

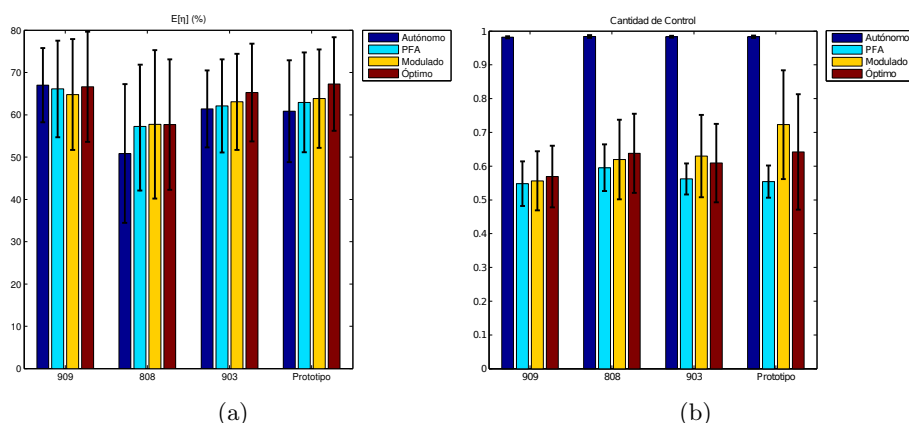


Figura 5.2: Valor promedio y varianza de a) la eficiencia global, b) control, del comando emergente de los usuarios 808, 903 y 909

Para apreciar mejor cómo se está proporcionando la ayuda a cada usuario, se puede observar la Fig. 5.3, donde se muestra la cantidad de ayuda para los distintos usuarios a lo largo de la trayectoria en modo autónomo, colaborativo, adaptativo y óptimo. La ayuda en modo autónomo, como ya se ha comentado, busca simplemente evitar la colisión, sin modificar los comandos del usuario más allá de detenerlo en caso de ser necesario (usuarios 808 y 903). Cabe resaltar que la cantidad de ayuda en modo colaborativo es casi estable y en torno a 0.45 para los tres usuarios testados. En el caso adaptativo, la ayuda oscila más y se diferencia de unos a otros. Puede observarse, por ejemplo, que el usuario 808 experimenta una disminución en la cantidad de ayuda necesaria al inicio de la trayectoria, mientras que los otros dos requieren un incremento. Más adelante, la ayuda aportada a 808 oscila suavemente, mientras que para 903 decrece de forma continua y para 909 se mantiene. En general, puede observarse como la cantidad de ayuda en este caso es inferior al caso colaborativo salvo en áreas puntuales (ej. 0-3 metros para el usuario 903). Tal como se ha mencionado anteriormente, el caso óptimo no se puede comparar equitativamente, ya que la trayectoria seguida es muy distinta. No obstante, se aprecia un efecto parecido al caso adaptativo: menor ayuda aportada salvo en zonas específicas y mayor variación entre un paciente y otro. Los beneficios son obvios, por ejemplo, para el paciente 808, que necesita una cantidad de ayuda muy inferior en el modo óptimo en tanto que se adecua mucho mejor al camino. Aunque de forma no tan notable, también son apreciables para 903 y, en menor medida,

para 909. En el caso de 909 la ayuda en media no varía excesivamente, pero puede observarse que está mucho más localizada y se reduce por zonas.

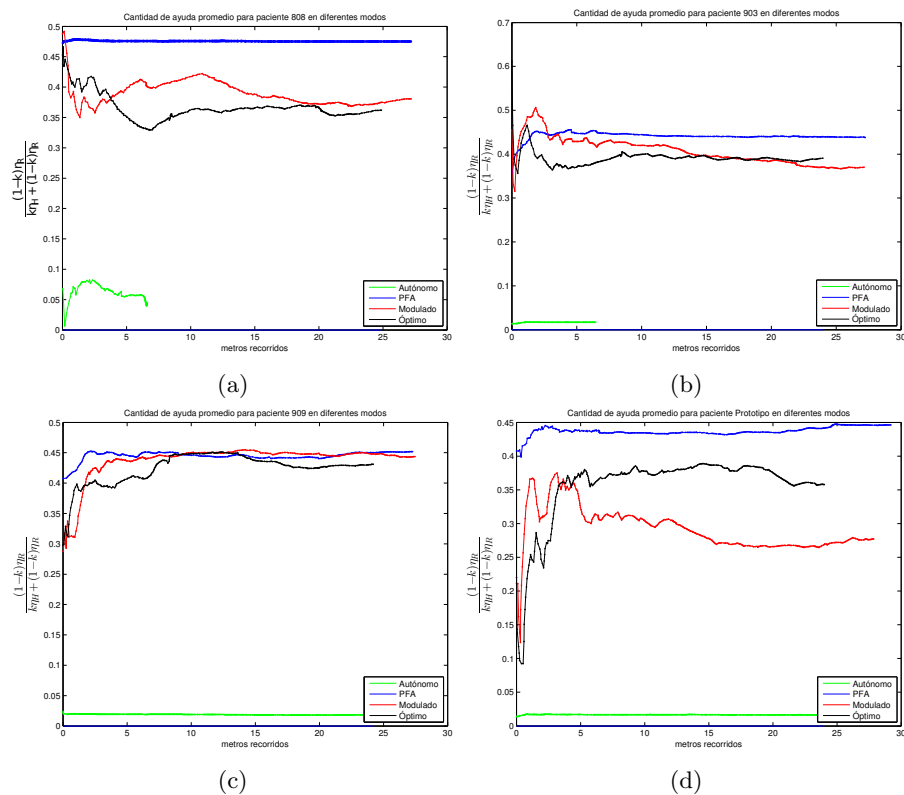


Figura 5.3: Ayuda proporcionada durante el recorrido a los usuarios 808, 903 y 909 en los diferentes modos

Para completar el estudio anterior, se va a mostrar el efecto de la cantidad de ayuda proporcionada en la eficiencia del comando de salida de cada usuario a lo largo de la trayectoria en los distintos modos (Fig. 5.4). Puede observarse que el prototipo es bastante estable en eficiencia en el recorrido previsto. El usuario 808 en modo autónomo parte de una eficiencia alta, que va bajando de forma marcada cuando necesita cruzar la puerta hasta llegar a un punto donde ya no es capaz de maniobrar. El usuario 903, por su parte, mantiene una eficiencia estable al cruzar la puerta, pero no es capaz de ejecutar por si solo el giro a la derecha necesario para alcanzar el otro extremo del pasillo. El usuario 909, por su parte, experimenta una bajada de eficiencia al atravesar la puerta y luego se mantiene en torno al 60% todo el tiempo, frente al casi 70% del usuario prototipo.

En modo colaborativo, el usuario 808 presenta la eficiencia más baja, pero más estable de todas, acercándose a la del prototipo en modo autónomo. Los dos modos adaptativos devuelven comandos más eficientes, si bien con más oscilaciones (suaves) en tanto que se devuelve control al usuario siempre que sea posible. Esta misma conclusión, aunque de forma menos marcada, es también aplicable al usuario 903, que experimenta una subida de eficiencia entre 4 y 7 metros al pasar de modo colaborativo a adaptativo-reactivo aunque, curiosamente, en esa zona se le proporciona menos ayuda en el segundo modo (Fig. 5.3b). Este efecto es frecuente: cuando se da ayuda indeseada a un usuario en una zona en que puede valerse, a veces se consigue el efecto



contrario, en tanto que el usuario puede rechazarla. En el caso del usuario 909 la eficiencia de los comandos de salida se mantiene más o menos similar en todos los modos, con cierta mejora del modo óptimo con respecto al resto. Este usuario era el que presentaba mejor condición física y cognitiva y, por tanto, menor necesidad de ayuda en casos puntuales, así que principalmente se beneficia de un camino más favorable a su perfil.

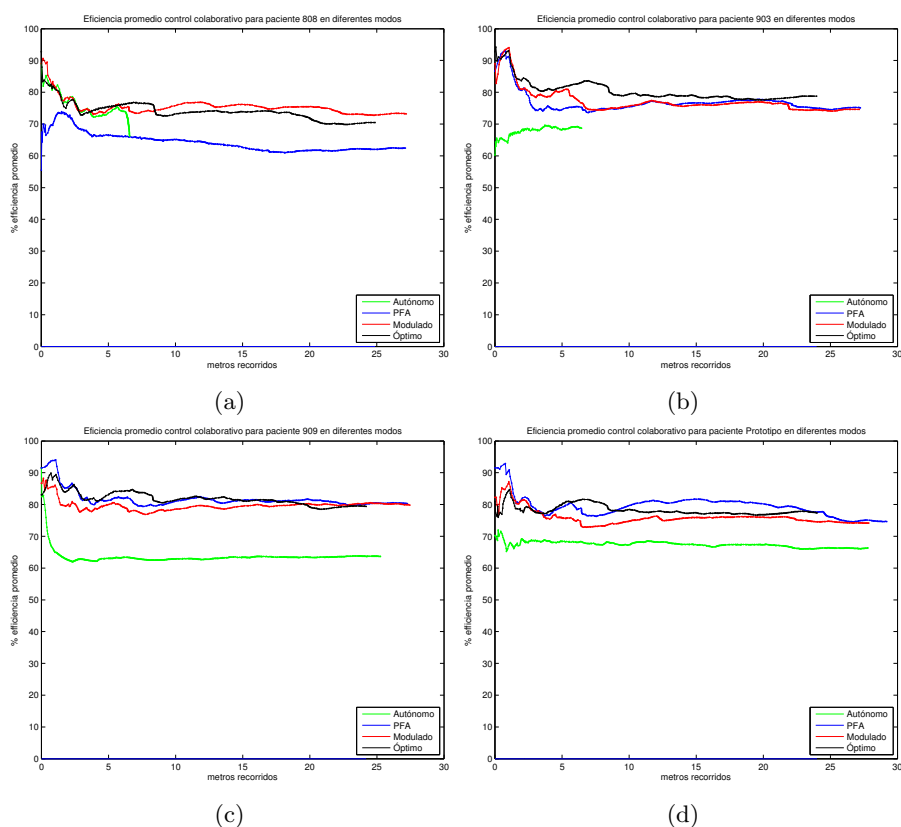


Figura 5.4: Eficiencia del comando emergente durante el recorrido de los usuarios 808, 903 y 909 en los diferentes modos

### 3. Conclusiones

Este capítulo ha presentado las pruebas del sistema completo integrado para distintos usuarios en un ala del hospital Santa Lucia (Roma). Se ha comprobado como evolucionan las distintas métricas empleadas a lo largo del documento al pasar de modo autónomo a reactivo-colaborativo, reactivo-adaptativo y óptimo (deliberado más reactivo adaptativo).

En general, se ha comprobado que cualquier modo de funcionamiento se encarga de que los distintos usuarios sean capaces de completar la tarea encargada con mayor o menor dificultad. Tal como se preveía, los modos de control compartido adaptativo hacen que la ayuda se ajuste más al perfil del usuario, no necesariamente en el sentido de que se incremente la eficiencia de sus comandos, sino de que sea necesario aportar menor cantidad de ayuda en general y mayor cantidad en situaciones puntuales.

Esta medida no incrementa el rechazo al sistema, como se evidencia en el *Desacuerdo*, y facilita la trayectoria, como se observa en los menores tiempos para la terminación de ésta. La incorporación de una capa deliberativa provoca cambios significativos en las trayectorias, ya que busca los caminos que el usuario pueda recorrer de forma más cómoda a sus capacidades, al tiempo que adapta la ayuda a cada situación puntual. En conjunto, esta medida incrementa la eficiencia de los usuarios, dado que tratan de favorecerse caminos en los que dicha eficiencia es buena, al tiempo que se disminuye la cantidad de ayuda aportada, permitiendo al usuario ejercer al máximo sus capacidades. Por lo tanto, cabe concluir que el sistema híbrido propuesto (óptimo) iguala los resultados de los distintos usuarios, ajustándose lo más posible a las capacidades de cada uno, como prueba el aumento de la varianza de métricas como la eficiencia o la cantidad de control que retiene cada uno.

## Conclusions and future work

“  
 –I want you to take the time to learn the Babylon 5 mantra. Ivanova is always right. I will listen to Ivanova. I will not ignore Ivanova’s recommendations. Ivanova is God.  
 –And if this ever happens again Ivanova will personally rip your lungs out! (...)  
 Just kidding about that God part. No offense  
 \_\_\_\_\_  
 Babylon 5”

### 1. Conclusions

Population aging in developed countries is being accompanied by an increasing number of people affected by chronic diseases that may lead to disability. Disability is hard to define, unless in a broad sense. Hence, specialists usually define it in terms of lack of capability to carry out the so called basic *Activities of Daily Living* such as bathing, eating, using the toilet and walking across a room, as well as shopping and meal preparation. Persons that can not carry out their *Activities of Daily Living* on their own become dependent and either need help at home or institutionalization. Leaving personal and social costs aside, it is estimated that the costs of health care could rise from 1.3 trillion to over 4 trillion dollars for these reasons. Mobility has been specifically targeted as one of the main issues regarding dependency. Assistive devices are typically used to cope with mobility problems. If these problems are severe, robotized assistive devices are employed. This dissertation focuses on robotic wheelchairs.

The main problem with robotized assistive devices is to adapt them to each potential user. It has been reported by clinicians that an excess of assistance may lead to loss of residual skills, whereas lack of help may lead to failure in achieving the desired *Activities of Daily Living*. Furthermore, lack of adaptation to the device leads to frustration and rejection of assistance. Unfortunately, disability depends on multiple variables and has a different impact in each person. Even though there are many scales, questionnaires and metrics, it is still hard to predict a priori how much help a given individual may need based on his/her condition. Instead, this dissertation focuses on predicting what the user needs in terms of what he/she can do in the different situations he/she may face while conducting *Activities of Daily Living*.

A review of current robotic wheelchair technology proves that all systems rely on the so-called shared control, where both user and robot make decisions about what to do. Share control may

range from safeguard navigation -where users are in charge until a hazardous situation is detected and then the robot takes over- to traditional robot control -where the user simply states a goal and the robot is in charge of everything else-. Behavior-based assistance is very popular: the user is in control until he/she decides to let the robot cope with a difficult situation, like door crossing or corridor navigation.

There are two common problems to most traditional shared control: i) it is hard to modulate how much assistance to give to the user; and ii) control swaps might be sharp unless they are triggered by the user. Alternatively, instead of swapping control from user to robot according to reestablished criteria, we focus on what we call collaborative control. The target of this type of control is to blend robot's and user's commands as seamlessly as possible. In this dissertation we prove how collaborative control is closer to the properties of a navigation function than traditional shared control system.

We have tested different alternatives to adapt control to the user's needs: purely reactive efficiency based weighting [80, 142, 143] and hybrid approaches including biometrics based modulation [60, 144], efficiency inertia based modulation [145] and modulation based on doctor advice [35]. The main drawback of purely reactive weighting are potential oscillations in control in difficult areas. Modulation based approaches partially solve this issue, but they are based on step functions. In order to provide continuous modulation, and, hence, better adaptation to the user's needs, it is necessary to do some estimation on the user's navigation skills. We have extracted a benchmark navigation profile from data from wheelchair navigation tests to achieve this goal. These tests were performed by more than 80 volunteers during 3 years at Fondazione Santa Lucia (Rome). We conducted a 3-level clustering process to progressively split gathered data into: i) a number of local navigation situations; ii) a number of wheelchair configurations with respect to the goal in each navigation situation; and iii) a number of possible solutions to each configuration as performed by volunteers. Solutions are averaged after weighting them by their respective efficiency. Hence, the prototypes of the classes are not the best solutions, but the best, most frequent ones. The resulting profile explains how an .averageuser would cope with each possible situation in the environment [88,90]. Hence, when a given user is navigating we can compare his/her skills to cope with the situation at hand with the prototype's and decide how much assistance need to be given to equalize his/her performance with the standard [146,147].

The proposed technique is adequate to adapt assistance to whatever the user decides to do depending on his/her condition, but it operates in a reactive fashion, i.e. it does not prevent users from moving into areas that could be difficult to handle because it lacks a predictive layer. To solve this issue, this dissertation proposes a full hybrid 3-Tier architecture where collaborative control operates as reactive layer, but a deliberative one is in charge of prediction. The ultimate role of the deliberative layer is to propose a path that the user may find easier to complete and leave low level adaptation to collaborative control. Since the user is never forced to follow any recommendation, the layer has been decided to be fast enough to recalculate paths as fast as necessary to offer alternatives as soon as the user moves out of the on-going path. This is achieved by using a hierarchical model of the environment that combines both metric and topological information. Path planning is performed at topological level and propagated down to metrical level in a top-down way.

In order to adapt paths to the user's skills, we need to add the user's profile information either to the model of the environment or to the path planning algorithm. We have chosen to add that information to the model because this provides information both for topological and metric operation at any time. Our model is based on building a 3D linked pyramid structure over the map, as proposed in [148]. The resulting pyramid is pruned and rearranged in a top-down way so that every remaining node in the structure is homogeneous and properly linked to similar adjacent regions. Nodes are described in terms of occupancy probability and region type, as

described in our benchmark prototype by clustering stages 1 and 2. Each user has a personal profile that describes how he/she fares with respect to the standard user to solve each of these situations, so the efficiency difference between user and prototype is handled as a transversality factor to move through each given node. The planning algorithm consequently takes into account not only the length of the path, but also the difficulty each given user would have to travel it. After the path is estimated at topological level, it is propagated down to metrical level via the arranged link structure, where it is used as input to set partial goals for the reactive layer, as we proposed in [149].

## 2. Future work

After the proposed architecture has been fully tested and validated, there are several potential followups in the future.

First, it could be interesting to extend the *HCI* from traditional joysticks to non conventional, specialized interfaces, like puffers, eye-trackers or, specially, *Interfaz Cerebro-Computador (Brain Computer Interface)s (interfaces cerebro-computador (Brain Computer Interfaces))*. The system has been built in a modular way, so its input block may change with minor alteration of the rest of the system as long as we can extract the user's intention. However, there are different issues associated to each type of interface whose impact needs to be evaluated in our architecture, like, for example, stress or mental fatigue. This requires testing by volunteers using the desired interface and, potentially, redesign of the weighting strategy in collaborative control.

It can also be noted that the system has been tested in indoor, home-like environments. Although this approach fits perfectly the target of the dissertation -enabling persons with special needs to remain home as much as possible- it would also be interesting to test the system in more complex environments, i.e. outdoors or in highly dynamic ones. Outdoors testing would require at the very least to change the input sensors, since our laser is designed for indoor applications. Testing in crowded areas, like hospital or residence corridors would be more immediate. We do not expect major changes in the system to adapt to these environments, since computationally complex modules have been designed in a hierarchical way to reduce processing times and the whole architecture works asynchronously to achieve the best possible response at any time instant given the available data. However, we would need extensive testing to have a grounded idea on the effects of unpredictable, fast changes in input instance, plus the effects of driving in more complex situations on the user him/herself.

Finally, it would be interesting to extend the proposed methodology to other assistive devices. Specifically, we are planning to extend this collaborative architecture to active walkers, so we can modulate the amount of physical support offered to users depending on their needs and rehabilitation programs -if any-. Although many concepts are immediate to translate, there are many new issues to be covered including: i) equilibrium; ii) estimation of the user's intention; iii) estimation of significant parameters; iv) selection of appropriate sensors; iv) modelization of the user; v) benchmarking.

It is also interesting from a development point of view to determine the minimum hardware and software required to "smart-up." a simple power wheelchair and incorporate collaborative control in a modular way to whatever people are already using, so that the proposed technology could be distributed to the target population. New generations of power wheelchairs include connection ports such as usb or even Bluetooth. They are ready to be operated using a laptop or mobile phone, in a standard and reliable way.



## Listado de publicaciones

- M. Fernandez-Carmona, B. Fernandez-Espejo, J.M. Peula, C. Urdiales, and F. Sandoval. Efficiency based collaborative control modulated by biometrics for wheelchair assisted navigation. In *Proc. of 2009 IEEE Conf. on Robotics for Rehabilitation (ICORR'09)*, Kyoto, Japan, 2009
- C. Urdiales, M. Fernández-Carmona, J.M. Peula, R. Annicchiaricco, F. Sandoval, and C. Caltagirone. Efficiency based modulation for wheelchair driving collaborative control. In *Proc. of 2009 IEEE Conf. on Robotics for Rehabilitation (ICRA'10) (nominated best paper)*, Anchorage, USA, 2010
- C. Urdiales, M. Fdez-Carmona, J.M. Peula, R. Annichiaricco, F. Sandoval, and C. Caltagirone. A collaborative control scheme for haptics-based blind wheelchair driving. In *Proc. of 2010 National Robotic Conference*, Karpacz, Poland, 2010
- Cristina Urdiales García, José Manuel Peula Palacios, Manuel Fernández Carmona, C. Barrue, Eduardo Javier Pérez Rodríguez, María Isabel Sánchez Tato, José Carlos del Toro Lasanta, F. Galluppi, U. Cortes, R. Annichiaricco, C. Caltagirone, and Francisco Sandoval Hernández. A new multi-criteria optimization strategy for shared control in wheelchair assisted navigation. *Autonomous Robots*, 2011
- Cristina Urdiales, Manuel Fernández-Carmona, José Manuel Peula, Ulises Cortés, Roberta Annichiaricco, Carlo Caltagirone, and Francisco Sandoval. Wheelchair collaborative control for disabled users navigating indoors. *Artificial Intelligence in Medicine*, 52(3):177 – 191, 2011
- G. Peinado, C. Urdiales, J. M. Peula, M. Fdez-Carmona, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. Navigation skills based profiling for collaborative wheelchair control. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 2229–2234, 2011
- José Manuel Peula-Palacios, Cristina Urdiales, Ignacio Herrero, Manuel Fernandez-Carmona, and Francisco Sandoval. Case-based reasoning emulation of persons for wheelchair navigation. *Artificial intelligence in medicine*, 56(2):109–121, October 2012

- C. Urdiales, E.J. Perez, G. Peinado, M. Fdez-Carmona, J.M. Peula, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. On the construction of a skill-based wheelchair navigation profile. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 21(6):917–927, 2013
- C. Urdiales, M. Fdez-Carmona, J.M. Peula, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. On the emulation of a standard wheelchair user for benchmarking. Submitted to *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2013



**A\*** Algoritmo heurístico de planificación que reduce la complejidad del problema favoreciendo aquellos caminos de menor coste (distancia) entre el origen y destino. 39

**Actividades de la Vida Diaria** Las actividades de la vida diaria son las ocupaciones que componen la actividad cotidiana, actividad conformada por las actividades de autocuidado, trabajo y juego/ocio. Según la AOTA las AVD se dividen en en actividades básicas de la vida diaria y actividades instrumentales de la vida diaria . 85, 89

**Actividades instrumentales de la Vida Diaria** Son aquellas Actividades de la Vida diaria que permiten a la persona adaptarse a su entorno y mantener una independencia en la comunidad. 89

**Activities of Daily Living** Actividades de la Vida Diaria. 1, 2, 4, 6, 79

**Agnosia** Desorden neurológico que impide reconocer o aprender estímulos, pese a no existir deficiencia en en la percepción, lenguaje o intelecto. 10

**Aparaxia** Desorden neurológico caracterizado por la pérdida de habilidad para ejecutar o llevar a cabo intencionalmente movimientos aprendidos, pese a tener el deseo y la habilidad física para realizarlos. 10

**Autonomía Ajustable** Función de control para estimar cuanto peso se otorga en la decisión a un agente en un sistema multiagente cooperativo. 47, 89

**Barthel** ,índice de. Indicador médico de la condición física de una persona, relativa a su aptitud para las *AVD* en una escala de 0 a 100. 12

**Case Based Reasoning** El *Case Based Reasoning* (Razonamiento Basado en Casos) es el proceso de solucionar nuevos problemas basándose en las soluciones de problemas anteriores, mediante analogías. 89

**Collaborative Control** Particular case of shared control in which person and machine have a weight in every decision at the same time. 2

**control compartido** Paradigma de control en el que la persona y la máquina trabajan juntos según el principio de autonomía ajustable. 18, 48

**Deliberado** Paradigma de **arquitectura** de control basado en mantener un modelo actualizado del entorno, que se procesa para tomar decisiones mediante un algoritmo de planificación de caminos. 47

**Desacuerdo** Métrica de esfuerzo cognitivo que mide la diferencia de ángulo entre la dirección propuesta por el usuario y la dirección tomada por el móvil. Busca medir el estrés y la frustración, así como las dificultades de conducir el vehículo por su interfaz y dinámica propias . 18

**diagrama de Voronoi** Particionado de un mapa en polígonos convexos de forma que cada polígono contenga exactamente un punto generador. Todos los puntos dentro de un polígono están más cerca de su punto generador que de ningún otro. 33

**Disability** Degree of difficulty or inability to independently perform basic activities of daily living. 1, 2

**Escala de Depresión Geriátrica** Es un cuestionario de 30 puntos - 15 en la versión corta- en el que los participantes deben responder por sí o por no con respecto a cómo se sintieron en la última semana. Para la versión corta, se seleccionaron las preguntas del cuestionario con mayor correlación con los síntomas depresivos. Una puntuación de 0-4 se considera normal, según la edad, educación y quejas; 5-8 indica depresión leve; 9-11 indica depresión moderada; y 12-15 indica depresión severa. El cuestionario corto resulta más sencillo de usar para los pacientes con afecciones físicas y pacientes con demencia leve a moderada que pueden concentrarse por lapsos breves o se fatigan con facilidad. Se puede completar en 5 a 7 minutos. 89

**Función de Navegación** Función de potencial polar, morse y máxima en su frontera. 89

**híbrido** Paradigma de (**arquitectura**) de control basado en combinar una capa deliberada para la planificación y una capa reactiva para las acciones inmediatas mediante una capa intermedia de interacción que arbitra su interacción. 47

**HSV** Representación tridimensional del color basado en los componentes de tono (*hue*, en inglés), saturación (*saturation*) y brillo (*value*). Sigue una representación en coordenadas cilíndricas más cercana a la forma en que los humanos perciben los colores y sus propiedades. Los colores en HSV se agrupan las tonalidades de color, lo cual es distinto al caso RGB donde los colores no están necesariamente tan agrupados. 90

**Inconsistencia** Métrica de esfuerzo cognitivo relativo a la variación de los comandos de usuario para resolver una situación similar. Está aparentemente relacionado con sus habilidades cognitivas. 18

**Nearness Diagram** Algoritmo reactivo de esquivar obstáculos para escenarios densos y complejos. Utiliza una estrategia del tipo *divide y vencerás* para simplificar la navegación. Realiza una extracción de información a alto nivel e interpretación del entorno. Esa información se utiliza para generar comandos de movimiento. Esta técnica está bien adaptada a entornos dinámicos y no estructurados. 90

**negligencia unilateral** Síndrome que provoca que los pacientes dejen de atender el lado izquierdo de su cuerpo, del espacio e incluso de los objetos que le rodean. Pese a tener percepción de esta parte, es ignorada. 10

**Nivel de Intervención** Métrica de esfuerzo cognitivo relacionado con el porcentaje del tiempo que el usuario opera el interfaz durante el trayecto. 18

**ontología** Conjunto de objetos y relaciones que describen un dominio y permiten el intercambio de información y conocimiento. 33

**reactiva** Paradigma de (**arquitectura**) de control basada en asociar una entrada sensora con una respuesta fija. Los comportamientos emergentes son el resultado de combinar varios elementos como este. 47

**Red-Green-Blue** Color space where different colors are represented in a 3 dimensional coordinate system where x, y and z axes are assigned to the red, green and blue contributions, respectively. 90

**Salvaguarda (*safeguard*)** Variante de control compartido en la que la máquina sólo obtiene el control cuando se detecta una situación peligrosa. 48

**Three Tier** Paradigma de **arquitectura** de control híbrida basado en tres capas: un nivel bajo, reactivo, basado en comportamientos; un nivel intermedio, que secuencia la ejecución de los comportamientos según la temporización del nivel alto o deliberado. 89

**trabajo en grupo (*teamworking*)** Interacción entre varios agentes físicos y/o software con el objetivo de lograr un conjunto de logros comunes. 47

**Variación del Joystick** Métrica de esfuerzo cognitivo que mide el porcentaje del tiempo que el usuario cambia la posición del joystick más del 5%. Es proporcional al esfuerzo humano para conducir un vehículo. 18

**Valoración Geriátrica Integral** Proceso diagnóstico multidimensional e interdisciplinario, diseñado para identificar y cuantificar los problemas físicos, funcionales, psíquicos y sociales que pueda presentar el anciano, con el objeto de desarrollar un plan de tratamiento y seguimiento de dichos problemas así como la óptima utilización de recursos para afrontarlos. 90



- 3T** Three Tier. 47, 87
- AA** Autonomía ajustable. 47
- AD** Asistive Device. 1
- ADL** Activities of Daily Living. 85
- AIVD** Actividades Instrumentales de la Vida Diaria. 11, 12, 85
- AOTA** Asociación Americana de Terapia Ocupacional (*American Occupational Therapy Association*). 85
- AVD** Actividades de la Vida Diaria. 11, 12, 14–16, 19, 21, 23, 31, 85
- BCI** Interfaz Cerebro-Computador (*Brain Computer Interface*). 81
- CBR** Case Based Reasoning. 85
- CGA** Comprehensive Geriatric Assessment. 3
- CIF** Clasificación Internacional del Funcionamiento de la discapacidad y de la salud. 11
- CIRS** Escala de Puntuación Acumulativa de Enfermedad (*Cumulative Illness Rating Scale*). 12
- CIRS-G** Escala de Puntuación Acumulativa de Enfermedad en Geriátrica (*Cumulative Illness Rating Scale for Geriatrics*). 12
- DWA** Dynamic Window Approach. 5, 48, 89
- EDG** Escala de Depresión Geriátrica. 86, 90
- EMD** Evaluación MultiDimensional. 89, 90
- FD** Functional disability. 2

**FEW** Functioning everyday with a wheelchair. 3, 14, 15

**FN** Función de Navegación. 48–52, 54, 55, 57, 59, 61, 62, 69, 86

**FSL** Fondazione Santa Lucia. 43

**GDP** Gross Domestic Product. 1

**GDS** Geriatric Depression Scale. 3, 12

**HCI** Human/Computer Interface. 2, 17, 81

**HSV** HSV. 40, 86

**IHM** Interfaz Hombre/Máquina. 90

**MAID** Mobile Aid for Elderly and Disabled people. 2

**MDE** Evaluación MultiDimensional. 3

**MMSE** Mini-Mental State Examination. 3, 13, 14

**MPT** The Matching Person and Technology. 3, 14

**ND** Nearness Diagram. 56, 86

**OMS** Organización Mundial de las Salud. 11

**PCM** *Press-Competence Model*. 61

**PFA** Potential Fields Approach. 48–50, 56–58, 61–63

**PIADS** Psychosocial Impact of Assistive Devices Scale. 3, 14

**QUEST** Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology. 3, 15

**RGB** Red-Green-Blue. 56, 57, 87

**SPA** Sense-Plan-Act. 4

**SSH** Spatial Semantic Hierarchy. 33

**TAMP** Tufts Assessment of Motor Performance. 16

**TLX** Task Load Index. 3, 15

**VAHM** Vehicule Autonome pour Handicapes Moteurs. 2

**VFM** Valutazione Funzionale Mielolesi. 16

**VGI** Valoración Geriátrica Integral. 87, 89

**WST** Wheelchair Skills Test. 16

## Glosario de Símbolos

- $\alpha_{dir}$  Ángulo entre el comando y la dirección del próximo objetivo. 51
- $\alpha_{sf}$  Ángulo entre el comando y el vector de repulsión generado por los obstáculos cercanos. 52, 54
- $\alpha_{sm}$  Ángulo entre la orientación del robot y el vector comando. 51
- $\mathbb{C}^2$  Clase de continuidad dos. 48, 51
- $CP(i)$  Prototipo de la clase  $i$ ésima del perfil de navegación. 20
- $D_c$  Distancia de colisión. 3, 17
- $D_s$  Distancia de detención. 3, 17
- $\eta$  Eficiencia global del comando reactivo. 21, 50–59, 61, 62, 69
- $\eta_{dir}$  Factor de directividad de la eficiencia. 51, 56, 57
- $\eta_H$  Eficiencia global del comando reactivo del usuario. 53, 60
- $\eta_{sf}$  Factor de seguridad de la eficiencia. 50, 51, 54, 56, 57, 61
- $\eta_{sm}$  Factor de suavidad de la eficiencia. 51, 56, 57
- $\varphi$  Función de potencial, eventualmente función de navegación. 48
- $Q$  Espacio de estados libres de obstáculos. 5, 48, 49
- $\bar{q}_G$  Posición del destino. 49, 51–54
- $\bar{q}_i$  Posición  $i$ ésima del robot en el espacio. 51
- $T_c$  Time to collision. 3, 17

$T_s$  Time to stop. 3, 17

$\vec{V}$  Vector comando de movimiento. 51, 52

$\vec{V}_C$  Vector comando colaborativo. 50, 52

$\vec{V}_H$  Vector comando humano. 50, 54

$\vec{V}_R$  Vector comando robótico. 50, 54

$\vec{V}(x)$  Vector comando de movimiento, como función de la posición. 52

$\bar{x}$  Posición del robot. 52

$\bar{x}_g$  Estado correspondiente a la posición de destino. 5

$\bar{x}_i$  Estado *i*ésimo del robot. 5



## Bibliografía

- [1] L. de Witte and Gelderblom G.J., editors. *Building a society for all ages, United Nations Department of Public Information (DPI/2264)*, pages 101–105. IOS Press, 2002.
- [2] Konstantinos Giannakouris and Ivana Kulhánová. Regional population projections EUROPOP2008. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-EG-10-001/EN/KS-EG-10-001-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-EG-10-001/EN/KS-EG-10-001-EN.PDF), January 2010. [Online; accessed 19-August-2013].
- [3] Applica CESEP Alphametrics. Men and women with disabilities in the EU, March 2007.
- [4] R. Ciole and B. Trusko. Healthcare 2020: Challenges for the millennium. *Health Management Technology*, 20(7):36–38, Aug 1999.
- [5] Graham D. Rowles and Miriam Bernard, editors. *Environmental Gerontology: Making Meaningful Places in Old Age*. Springer Publishing Company, 11 West 42nd Street, New York, NY 10036, 2013.
- [6] U. Cortés, R. Annicchiarico, A. Villar, C. Barrué, C. Urdiales, and C. Caltagirone. Refocusing e-tools: Towards a patient's oriented vision. In *Proc. of 17th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'06)*, Trento, Italy, 2006.
- [7] E. Prassler, J. Scholz, and P. Fiorini. Navigating a robotic wheelchair in a railway station during rush hour. *Int. Journal on Robotics Research*, 18(7):760–772, 1999.
- [8] I. Volosyak, O. Kouzmitcheva, D. Ristic, and A. Gräser. Improvement of visual perceptual capabilities by feedback structures for robotic system friend. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 35(1):66–74, 2005.
- [9] Robert F. Schoeni, Vicki A. Freedman, and Linda G. Martin. Why is late-life disability declining? *Milbank Quarterly*, 86(1):47–89, 2008.
- [10] Anna Hudakova and Anna Hornakova. Mobility and quality of life in elderly and geriatric patients. *International Journal of Nursing and Midwifery*, 3(7):81–85, July 2011.

- [11] Christopher L. Seplaki, Emily M. Agree, Carlos O. Weiss, Sarah L. Szanton, Karen Bandeen-Roche, and Linda P. Fried. Assistive devices in context: Cross-sectional association between challenges in the home environment and use of assistive devices for mobility. *The Gerontologist*, 2013.
- [12] U. Cortés, R. Annicchiarico, F. Campana, J. Vázquez-Salceda, C. Urdiales, L. Cañero, M. López, M. Sánchez-Marré, S. Di Vincenzo, and C. Caltagirone. Intelligenza artificiale in medicina: progetto di una piattaforma mobile inserita in un ambiente intelligente per l'assistenza ai disabili e agli anziani. *Recenti Progressi in Medicina*, 95(4):190–195, 2004.
- [13] L. Fehr, W. E. Langbein, and S. B. Skaar. Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities: a clinical survey. *J Rehabil Res Dev*, 37(3):353–360, 2000. [PubMed:10917267].
- [14] R. C. Simpson, E. F. LoPresti, and R. A. Cooper. How many people would benefit from a smart wheelchair? *J Rehabil Res Dev*, 45(1):53–71, 2008. [PubMed:18566926].
- [15] D. J. Bruemmer, D. A. Few, R. L. Boring, J. L. Marble, M. C. Walton, and C. W. Nielsen. Shared understanding for collaborative control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 25(4):494–504, july 2005.
- [16] J. Kofman, X. Wu, T. J. Luu, and S. Verma. Teleoperation of a robot manipulator using a vision-based human-robot interface. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(5):1206–1219, october 2005.
- [17] Y. Horiguchi and T. Sawaragi. Effects of probing to adapt machine autonomy in shared control systems. In *Proc. International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 1, pages 317–323, Hawaii, USA, october 2005.
- [18] P. Aigner and B. J. McCarragher. Modeling and constraining human interactions in shared control utilizing a discrete event framework. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30(3):369–379, may 2000.
- [19] S. P. Parikh, V. Grassi, V. Kumar, and J. Okamoto. Usability study of a control framework for an intelligent wheelchair. In *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4745–4750, Barcelona, Spain, April 2005.
- [20] S. Parikh, V. Grassi, V. Kumar, and J. Okamoto. Incorporating user inputs in motion planning for a smart wheelchair. In *Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2043–2048, New Orleans, USA, April 2004.
- [21] S. McLachlan, J. Arblaster, D. K. Liu, J. Valls, and L. Chenoweth. A multi-stage shared control method for an intelligent mobility assistant. In *Proc. of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pages 426–429, Chicago, USA, July 2005.
- [22] J. H. Connell and P. Viola. Cooperative control of a semi-autonomous mobile robot. In *Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pages 1118–1121, Cincinnati, USA, 1990.
- [23] R. Simpson and S. P. Levine. Navchair: An assistive wheelchair navigation system with automatic adaptation. In Mittal et al., editor, *Assistive Technology and AI. LNAI 1458*, pages 235–255. Springer-Verlag, 1998.

- [24] David P. Miller. Assistive robotics: An overview. In Vibhu O. Mittal, Holly A. Yanco, John Aronis, and Richard Simpson, editors, *Assistive Technology and Artificial Intelligence*, volume 1458 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 126–136. Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [25] R. S. Rao, K. Conn, S. H. Jung, J. Katupitiya, T. Kientz, V. Kumar, J. Ostrowski, S. Patel, and C. J. Taylor. Human robot interaction: Applications to smart wheelchairs. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, USA, 2002.
- [26] R. A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1):14–23, 1986.
- [27] H. A. Yanco. Wheelchair: A robotic wheelchair system: indoor navigation and user interface, assistive technology and artificial intelligence. *Applications in Robotics, User Interfaces and Natural Language Processing*, pages 256–268, 1998.
- [28] G. Bourhis and Y. Agostini. The vahn robotized wheelchair: System architecture and human-machine interaction. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 22(1):39–50, 1998.
- [29] R. Madarasz, L. Heiny, R. Crompt, and N. Mazur. The design of an autonomous vehicle for the disabled. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 2(3):117–126, 1986.
- [30] T. Gomi and A. Griffith. *Developing Intelligent Wheelchairs for the Handicapped*, pages 150–178. Springer-Verlag, 1998.
- [31] R. Simpson and S. Levine. Development and evaluation of voice control for a smart wheelchair. In *Proc. Annu. RESNA Conf.*, pages 417–419, Washington, USA, 1997.
- [32] J. Crisman and M. Cleary. *Progress on the deictic controlled wheelchair*, pages 137–149. Springer-Verlag, 1998.
- [33] P. Nisbet, J. Craig, P. Odor, and S. Aitken. 'smart' wheelchairs for mobility training. *Technol. Disability*, 5:49–62, 1995.
- [34] U. Frese, P. Larsson, and T. Duckett. A multigrid algorithm for simultaneous localization and mapping. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(2):1–12, 2005.
- [35] Cristina Urdiales, Manuel Fernández-Carmona, José Manuel Peula, Ulises Cortés, Roberta Annichiarico, Carlo Caltagirone, and Francisco Sandoval. Wheelchair collaborative control for disabled users navigating indoors. *Artificial Intelligence in Medicine*, 52(3):177 – 191, 2011.
- [36] J. M. Guralnik and E. M. Simonsick. Physical disability in older Americans. *J Gerontol*, 48 Spec No:3–10, Sep 1993. [PubMed:8409237].
- [37] T.D. Downs H.R. Cash S. Katz and R.C. Grotz. Progress in development of the index of adl. *Gerontologist*, 10:20–30, 1970.
- [38] M. P. Lawton and E. M. Brody. Assessment of older people: self-maintaining and instrumental activities of daily living. *Gerontologist*, 9(3):179–186, 1969. [PubMed:5349366].
- [39] S. Parikh, R. Rao, J. Sang-Hack, K. Vijay, J.P. Ostrowski, and C.J. Taylor. Human robot interaction and usability studies for a smart wheelchair. *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proc. 2003 IEEE/RSJ Int. Conf.*, 4:3206–3211 vol.3, 27-31 Oct. 2003.

- [40] H. A. Yanco. Evaluating the performance of assistive robotic systems. In *Proc. of Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, pages 417–419, Gaithersburg, MD, USA, 2002.
- [41] U. Cortés, C. Urdiales, R. Annicchiarico, C. Barru, A. B. Martínez, and C. Caltagirone. Assistive wheelchair navigation: A cognitive view. In Ashlesha Jain Ajita Ichalkaranje Lakhmi C. Jain Nikhil Ichalkaranje (Eds.) Hiro Yoshida, editor, *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 1*, pages 165–187. Springer Berlin / Heidelberg, 2007.
- [42] J. Cooperstock, J. Pineau, D. Precup, A. Atrash, R. Jaulmes, R. Kaplow, N. Lin, C. Prahacs, J. Villemure, and H. Yamani. Smartwheeler: A robotic wheelchair test-bed for investigating new models of human-robot interaction. In *Proc. of the IEEE Conference on Intell. Robots and Systems (IROS)*, San Diego, USA, 2007.
- [43] R.M. Crum, J.C. Anthony, S.S. Bassett, and M.F. Folstein. Population-based norms for the mini-mental state examination by age and educational level. *Journal of the American Medical Association*, 269(18):2386–239, 1993.
- [44] J.A. Yesavage, T.L. Brink, T.L. Rose, O. Lum, V. Huang, M.B. Adey, and V.O. Leirer. Development and validation of a geriatric depression screening scale: A preliminary report. *Journal of Psychiatric Research*, 17:37–49, 1983.
- [45] F.I. Mahoney and D. Barthel. Functional evaluation: the barthel index. *Maryland State Medical Journal*, 14(14):56–61, Feb 1965. [PubMed:14258950].
- [46] S.G. Hart; and L.E. Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): results of empirical and theoretical research. In P A Hancock and Meshkati N (eds), editors, *Human mental workload*, pages 5–39. Elsevier, New York, USA, 1988.
- [47] M. Scherer, J. Jutai, M. Fuhrer, L. Demers, and F. DeRuyter. A framework for modeling the selection of assistive technology devices (atds). *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2(1):1–8, 2007.
- [48] J.W. Jutai and J.A. Bortolussi. Psychosocial impact of assistive technology: development of a measure for children. In L.P. McCormack R.B. Reilly & H.T.P. Knops (Eds.) G.M. Craddock, editor, *Assistive technology - Shaping the future*, pages 936–940. IOS Press, Amsterdam, 2003.
- [49] N. Gatti, M. Matteucci, and L. Sbattella. An adaptive and predictive environment to support augmentative and alternative communication. In K. Miesenberger D. Burger & W. Zagler (Eds.) J. Klaus, editor, *Lecture Notes in Computer Science: Proc. of 9th International Conference, ICCHP 2004*, volume 3118, pages 983–990. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2004.
- [50] T. Mills, M.B. Holm, E. Treffler, M. Schmeler, S. Fitzgerald, and M. Boninger. Development and consumer validation of the functional evaluation in a wheelchair (few) instrument. *Disability and Rehabilitation*, 24:38–46, 2002.
- [51] L. Demers, R. Weiss-Lambrou, and B. Ska. The quebec user evaluation of satisfaction with assistive technology (quest 2.0): An overview and recent progress. In L. de Witte and Gelderblom G.J., editors, *Technology and disability*, pages 101–105. IOS Press, 2002.
- [52] P. Capodaglio, C. Grilli, and G. Bazzini. Tolerable exercise intensity in the early rehabilitation of paraplegic patients. a preliminary study. *Spinal Cord*, 34:425–434, 1996.

- [53] B.M. Gans, S.M. Haley, S.C. Hallenborg, N. Mann, C.A. Inacio, and R.M. Faas. Description and interobserver reliability of the tufts assesment of motor performance. *Am J Phys Med Rehabil*, 67:202–10, 1998.
- [54] R.L. Kirby, J. Swuste, D.J. Dupuis, D.A. MacLeod, and R. Monroe. The wheelchair skills test: a pilot study of a new outcome measure. *Arch Phys Med Rehabil*, 83:10–18, 2002.
- [55] O. Kilkens, M.W. Post, A.J. Dallmeijer, H. Seelen, and L.H. van der Woude. Wheelchair skills tests: a systematic review. *Clinical Rehabilitation*, 17(4):418–430, 2003.
- [56] H. Hu and M. Brady. A parallel processing architecture for sensor based control of intelligent mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 17:235–257, 1996.
- [57] Ronald C. Arkin. *Behavior-based Robotics*. Intelligent Robotics and Autonomous Agents series. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1st edition, 1998.
- [58] R. A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47:139–159, 1991.
- [59] Erann Gat. On three-layer architectures. In *Artificial Intelligence and Mobile Robots*. MIT Press, 1998.
- [60] C. Urdiales, B. Fernandez-Espejo, R. Annicchiaricco, F. Sandoval, and C. Caltagirone. Biometrically modulated collaborative control for an assistive wheelchair. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 18(4):398–408, aug. 2010.
- [61] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 4(1):23–33, 1997.
- [62] Marcelo Kallmann, Yazhou Huang, and R. Backman. A skill-based motion planning framework for humanoids. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 2507–2514, 2010.
- [63] Maxim Likhachev, Geoff Gordon, and Sebastian Thrun. Ara\*: Anytime a\* with provable bounds on sub-optimality. In *IN ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS 16: PROCEEDINGS OF THE 2003 CONFERENCE (NIPS-03)*. MIT Press, 2004.
- [64] R. Diankov and J. Kuffner. Randomized statistical path planning. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1–6, 2007.
- [65] Takeshi Sasaki and Hideki Hashimoto. Intelligent space as a platform for human observation. In Nilanjan Sarkar, editor, *Human Robot Interaction*, chapter 17, pages 309–324. I-Tech Education and Publishing, 2007.
- [66] M. Niitsuma, T. Ochi, M. Yamaguchi, and H. Hashimoto. Interaction between a user and a smart electric wheelchair in intelligent space. In *Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2010 International Symposium on*, pages 465–470, 2010.
- [67] H. Seraji. Terrain-based robot navigation using multi-scale traversability indices. In *Fuzzy Systems, 2001. The 10th IEEE International Conference on*, volume 3, pages 1309–1314, 2001.
- [68] Guilherme A. S. Pereira, Luciano C. A. Pimenta, Alexandre R. Fonseca, Leonardo De Q. Corrêa, Renato C. Mesquita, Luiz Chaimowicz, Daniel S. C. De Almeida, and Mario F. M. Campos. Robot navigation in multi-terrain outdoor environments. *Int. J. Rob. Res.*, 28(6):685–700, June 2009.

- [69] Cristina Urdiales García, José Manuel Peula Palacios, Manuel Fernández Carmona, C. Barrue, Eduardo Javier Pérez Rodríguez, María Isabel Sánchez Tato, José Carlos del Toro Lasanta, F. Galluppi, U. Cortes, R. Annichiarico, C. Caltagirone, and Francisco Sandoval Hernández. A new multi-criteria optimization strategy for shared control in wheelchair assisted navigation. *Autonomous Robots*, 2011.
- [70] J. S. Webster, G. Cottam, W. D. Gouvier, P. Blanton, G. F. Beissel, and J. Wofford. Wheelchair obstacle course performance in right cerebral vascular accident victims. *J Clin Exp Neuropsychol*, 11(2):295–310, Mar 1989. [DOI:10.1080/01688638908400890] [PubMed:2925837].
- [71] R.L. Tate and I.D. Cameron. *A Compendium of Tests, Scales and Questionnaires: The Practitioner's Guide to Measuring Outcomes After Acquired Brain Impairment*. Psychology Press, 2010.
- [72] World Health Organization. *ICF : International classification of functioning, disability and health / World Health Organization*. World Health Organization Geneva, 2001.
- [73] World Health Organization. The icf checklist. icf-checklist.pdf, February 1988.
- [74] M Extermann, J Overcash, G H Lyman, J Parr, and L Balducci. Comorbidity and functional status are independent in older cancer patients. *J Clin Oncol*, 16(4):1582–7, 1998.
- [75] Yan Press, Yacov Grinshpun, Alex Berzak, Michael Friger, and A Mark Clarfield. The effect of co-morbidity on the rehabilitation process in elderly patients after hip fracture. *Arch Gerontol Geriatr*, 45(3):281–94, 2007.
- [76] Ulrich Wedding, Bernd Roehrig, Almuth Klippstein, Peggy Steiner, Thomas Schaeffer, Ludger Pientka, and Klaus Höffken. Comorbidity in patients with cancer: prevalence and severity measured by cumulative illness rating scale. *Crit Rev Oncol Hematol*, 61(3):269–76, 2007.
- [77] RESNA. Resource guide for assistive technology outcomes. *Measurement tools (Vol. I)*, 1998b.
- [78] F. Galluppi, C. Urdiales, A. Poncela, I. Sanchez-Tato, F. Sandoval, and M. Olivetti. A study on human performance in a cooperative local navigation robotic system. In *Proc. of CoMA Workshop (WETICE'08)*, Roma, Italy, 2008.
- [79] Osnat Fliess-Douer, Yves C Vanlandewijck, Galia Lubel Manor, and Lucas HV Van Der Woude. A systematic review of wheelchair skills tests for manual wheelchair users with a spinal cord injury: towards a standardized outcome measure. *Clinical Rehabilitation*, 24(10):867–886, 2010.
- [80] C. Urdiales, A. Poncela, I. Sánchez-Tato, and F. Sandoval. Efficiency based reactive shared control for collaborative human/robot navigation. In *Proc. of the IEEE Conference on Intell. Robots and Systems (IROS'07)*, San Diego, USA, 2007.
- [81] C. Urdiales, E.J. Pérez, J.Vázquez-Salceda, M.Sánchez-Marré, and F. Sandoval. A purely reactive navigation scheme for dynamic environments using case-based reasoning. *Autonomous Robots*, 39(5):67–78, 2006.



- [82] B. Kuipers. Building and evaluating an intelligent wheelchair. *Technical Report University of Texas*, 2006.
- [83] C. Urdiales, B. Fernández-Espejo, R. Annicchiaricco, F. Sandoval, and C. Caltagirone. Biometric modulated collaborative control for a robotic mobile platform. *Submitted to IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Eng. (accepted)*, 2010.
- [84] D. Limmer and M.F. O’Keefe. Emergency care. In E. T. Dickinson, editor, *Emergency Care*, page 214. Ed. Pearson, Prentice Hall (10th Ed.), Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2005.
- [85] C.W. Mundt, K.N. Montgomery, U.E. Udoh, V.N. Barker, G.C. Thonier, A.M. Tellier, R.D. Ricks, R.B. Darling, Y.D. Cagle, N.A. Cabrol, S.J. Ruoss, J.L. Swain, J.W. Hines, and G.T.A. Kovacs. A multiparameter wearable physiologic monitoring system for space and terrestrial applications. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 9(3):382–391, 2005.
- [86] D. Clarke, S. Yen, G. V. Kondraske, G. J. Khoury, and K. J. Maxwelle. Telerobotic network workstation for system performance and operator workload monitoring. *NASA JSC, Houston, TX, Tech. Rep. 91-013R*, 1991.
- [87] G. J. Khoury and G. V. Kondraske. Measurement and continuous monitoring of human workload associated with manual control devices. *NASA JSC, Houston, TX, Tech. Rep. 91-011R*, 1991.
- [88] G. Peinado, C. Urdiales, J. M. Peula, M. Fdez-Carmona, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. Navigation skills based profiling for collaborative wheelchair control. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 2229–2234, 2011.
- [89] J. Minguez, J. Osuna, and L. Montanor. A divide and conquer strategy based on situations to achieve reactive collision avoidance in troublesome scenarios. *IEEE Trans. on Robotics*, 2009.
- [90] José Manuel Peula-Palacios, Cristina Urdiales, Ignacio Herrero, Manuel Fernandez-Carmona, and Francisco Sandoval. Case-based reasoning emulation of persons for wheelchair navigation. *Artificial intelligence in medicine*, 56(2):109–121, October 2012.
- [91] Sebastian Thrun. Robotic mapping: a survey. In Gerhard Lakemeyer and Bernhard Nebel, editors, *Exploring artificial intelligence in the new millennium*, pages 1–35. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2003.
- [92] Emilio Remolina and Benjamin Kuipers. Towards a general theory of topological maps. *Artificial Intelligence*, 152(1):47 – 104, 2004.
- [93] J. Moras, V. Cherfaoui, and P. Bonnifait. Credibilist occupancy grids for vehicle perception in dynamic environments. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 84–89, 2011.
- [94] Boris Lau, Christoph Sprunk, and Wolfram Burgard. Efficient grid-based spatial representations for robot navigation in dynamic environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(10):1116 – 1130, 2013.

- [95] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2005.
- [96] Patrick Foil Beeson. *Creating and Utilizing Symbolic Representations of Spatial Knowledge using Mobile Robots*. PhD thesis, The University of Texas, August 2008.
- [97] Pär Buschka. *An investigation of hybrid maps for mobile robots*. PhD thesis, Örebro University, Department of Technology, 2005.
- [98] Ananth Ranganathan and Frank Dellaert. Online probabilistic topological mapping. *The International Journal of Robotics Research*, 30(6):755–771, 2011.
- [99] B. Kuipers. The spatial semantic hierarchy. *Artificial Intelligence*, 119:191–233, 2000.
- [100] Benjamin Kuipers. The "map in the head" metaphor. In *Environment and Behavior*, pages 202–220, 1982.
- [101] Stephen Tully, George Kantor, Howie Choset, and Felix Werner. A multi-hypothesis topological slam approach for loop closing on edge-ordered graphs. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, October 2009. IEEE Computer Society.
- [102] C. Codaud and A. Jnifene. Environment mapping using probabilistic quadtree for the guidance and control of autonomous mobile robots. In *Autonomous and Intelligent Systems (AIS), 2010 International Conference on*, pages 1–6, 2010.
- [103] Alex Yahja, Sanjiv Singh, and Anthony Stentz. An efficient on-line path planner for outdoor mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 32(2–3):129 – 143, 2000.
- [104] Hanan Samet. Multidimensional data structures for spatial applications. In Mikhail J. Atallah and Marina Blanton, editors, *Algorithms and theory of computation handbook*, pages 6–1–6–42. Chapman & Hall/CRC, 2010.
- [105] Cedric Codaud and Amor Jnifene. Environment mapping using probabilistic quadtree for the guidance and control of autonomous mobile robots. *Control and Intelligent Systems*, 39(4), 2011.
- [106] Roland Geraerts and Mark H. Overmars. Reachability-based analysis for probabilistic roadmap planners. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(11):824 – 836, 2007.
- [107] Jingyu Xiang, Y. Tazaki, T. Suzuki, and B. Levedahl. Variable-resolution velocity roadmap generation considering safety constraints for mobile robots. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on*, pages 854–859, 2012.
- [108] V. Pradeep, G. Medioni, and J. Weiland. Visual loop closing using multi-resolution sift grids in metric-topological slam. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*, pages 1438–1445, 2009.
- [109] Sebastian Thrun, Jens-Steffen Gutmann, Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Benjamin J. Kuipers. Integrating topological and metric maps for mobile robot navigation: A statistical approach. In *In Proceedings of the AAAI Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence*, 1998.



- [110] C. Urdiales, M. Dominguez, C. de Trazegnies, and F. Sandoval. A new pyramid-based color image representation for visual localization. *Image and Vision Computing*, 28(1):78 – 91, 2010.
- [111] R. Marfil, L. Molina-Tanco, A. Bandera, J.A. Rodríguez, and F. Sandoval. Pyramid segmentation algorithms revisited. *Pattern Recognition*, 39(8):1430 – 1451, 2006.
- [112] L. Fu, D. Sun, and L. R. Rilett. Heuristic shortest path algorithms for transportation applications: State of the art. *Comput. Oper. Res.*, 33(11):3324–3343, November 2006.
- [113] J. Antich, A. Ortiz, and J. Minguez. A bug-inspired algorithm for efficient anytime path planning. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5407–5413, 2009.
- [114] Armin Hornung, Maren Bennewitz, and Hauke Strasdat. Efficient vision-based navigation. *Auton. Robots*, 29(2):137–149, August 2010.
- [115] Nick Malone, Aleksandra Faust, Brandon Rohrer, John Wood, and Lydia Tapia. Efficient motion-based task learning. In *Robot Motion Planning Workshop, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, october 2012.
- [116] Matt Knudson and Kagan Tumer. Adaptive navigation for autonomous robots. *Robot. Auton. Syst.*, 59(6):410–420, June 2011.
- [117] S.M. Sharef, W.K. Sa'id, and F.S. Khoshaba. A rule-based system for trajectory planning of an indoor mobile robot. In *Systems Signals and Devices (SSD), 2010 7th International Multi-Conference on*, pages 1–7, 2010.
- [118] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein. *Dijkstra's Algorithm*. The MIT Press, 3rd edition, 2009.
- [119] Reinhard Bauer, Daniel Delling, Peter Sanders, Dennis Schieferdecker, Dominik Schultes, and Dorothea Wagner. Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for dijkstra's algorithm. *J. Exp. Algorithmics*, 15:2.3:2.1–2.3:2.31, March 2010.
- [120] Daniel Delling, Peter Sanders, Dominik Schultes, and Dorothea Wagner. Engineering route planning algorithms. In Jürgen Lerner, Dorothea Wagner, and Katharina A. Zweig, editors, *Algorithmics of Large and Complex Networks*, volume 5515 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 117–139. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [121] Craig Tovey, Sam Greenberg, and Sven Koenig. Improved analysis of d\*. In *In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, 2003.
- [122] S.F. Seidali Routh. Optimized d star algorithm with two phase motion in unknown damaged indoor environments. In *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2013 9th International Symposium on*, pages 1–5, 2013.
- [123] Kevin Grant and David Mould. Combining heuristic and landmark search for path planning. In *Proceedings of the 2008 Conference on Future Play: Research, Play, Share, Future Play '08*, pages 9–16, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [124] Gheorghe Lazea Radu Robotin and Cosmin Marcu. Graph search techniques for mobile robot path planning. In Laszlo Dudas, editor, *Engineering the Future*, chapter 8, pages 160–178. I-Tech Education and Publishing, 2010.

- [125] S. Singh, R. Simmons, T. Smith, A. Stentz, V. Verma, A. Yahja, and K. Schwehr. Recent progress in local and global traversability for planetary rovers. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1194–1200 vol.2, 2000.
- [126] Genya Ishigami, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Path planning and evaluation for planetary rovers based on dynamic mobility index. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 601–606, 2011.
- [127] Paul Scerri, David Pynadath, and Milind Tambe. Adjustable autonomy in real-world multi-agent environments. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, AGENTS '01, pages 300–307, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [128] J. P. Gunderson and W. N. Martin. Effects of uncertainty on variable autonomy in maintenance robots. In *Proc. of Agents'99, Workshop on Autonomy Control Software*, 1999.
- [129] G. Ferguson, J. Allen, and B. Miller. Trains-95 : towards a mixed initiative planning assistant. *Proc. of the Third Conf. on Artificial Intelligence Planning Systems*, pages 70–77, 1996.
- [130] G. A. Dorais, R. P. Bonasso, D. Kortenkamp, B. Pell, and D. Schreckenghost. Adjustable autonomy for human-centered autonomous systems on mars. In *First Int. Conf. of the Mars Society*, 1998.
- [131] R.R. Murphy. Human-robot interaction in rescue robotics. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 34(2):138–153, 2004.
- [132] D. Kortenkamp, R. P. Bonasso, D. Ryan, and D. Schreckenghost. Traded control with autonomous robots as mixed initiative interaction. In *Proc. AAAI Spring Symposium on Mixed Initiative Interaction*, Stanford, USA, 1997.
- [133] A. Morris, R. Donamukkala, A. Kapuria, A. Steinfeld, J. T. Matthews, J. Dunbar-Jacob, and S. Thrun. A robotic walker that provides guidance. In *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 25–30, Taipei, Taiwan, September 2003.
- [134] A. Al-Jumail and C. Leung. Wavefront propagation and fuzzy based autonomous navigation, 2005.
- [135] Robert B. Dial. Algorithm 360: shortest-path forest with topological ordering [h]. *Commun. ACM*, 12:632–633, November 1969.
- [136] S. Buck, U. Weber, M. Beetz, and T. Schmitt. Multi-robot path planning for dynamic environments: a case study. In *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 1245–1250 vol.3, 2001.
- [137] Jing Ren, K.A. McIsaac, and R.V. Patel. Modified newton's method applied to potential field-based navigation for mobile robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 22(2):384–391, april 2006.
- [138] E. Rimon and D.E. Koditschek. Exact robot navigation using artificial potential functions. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 8(5):501–518, 1992.

- [139] N.J. Cowan, G.A.D. Lopes, and D.E. Koditschek. Rigid body visual servoing using navigation functions. In *Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on*, volume 4, pages 3920–3926 vol.4, 2000.
- [140] L.C.A. Pimenta, A.R. Fonseca, G.A.S. Pereira, R.C. Mesquita, E.J. Silva, W.M. Caminhas, and M.F.M. Campos. On computing complex navigation functions. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 3452–3457, april 2005.
- [141] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 5(1):90–98, 1986.
- [142] A. Poncela, C. Urdiales, E.J. Perez, and F. Sandoval. A new efficiency-weighted strategy for continuous human/robot cooperation in navigation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 39(3):486–500, may 2009.
- [143] C. Urdiales, M. Fernández-Carmona, J.M. Peula, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. Efficiency based modulation for wheelchair driving collaborative control. In *Proc. of 2009 IEEE Conf. on Robotics for Rehabilitation (ICRA'10) (nominated best paper)*, Anchorage, USA, 2010.
- [144] M. Fernandez-Carmona, B. Fernandez-Espejo, J.M. Peula, C. Urdiales, and F. Sandoval. Efficiency based collaborative control modulated by biometrics for wheelchair assisted navigation. In *Proc. of 2009 IEEE Conf. on Robotics for Rehabilitation (ICORR'09)*, Kyoto, Japan, 2009.
- [145] C. Urdiales, M. Fdez-Carmona, J.M. Peula, R. Annichiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. A collaborative control scheme for haptics-based blind wheelchair driving. In *Proc. of 2010 National Robotic Conference*, Karpacz, Poland, 2010.
- [146] C. Urdiales, E.J. Perez, G. Peinado, M. Fdez-Carmona, J.M. Peula, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. On the construction of a skill-based wheelchair navigation profile. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 21(6):917–927, 2013.
- [147] C. Urdiales, M. Fdez-Carmona, J.M. Peula, R. Annicchiarico, F. Sandoval, and C. Caltagirone. On the emulation of a standard wheelchair user for benchmarking. Submitted to *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2013.
- [148] Antonio Bandera, Cristina Urdiales, and Francisco Sandoval Hernández. An hierarchical approach to grid-based and topological maps integration for autonomous indoor navigation. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2001: Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium*, pages 883–888. IEEE, 2001.
- [149] A. Poncela, E. J. Pérez, A. Bandera, C. Urdiales, and F. Sandoval. Efficient integration of metric and topological maps for directed exploration of unknown environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 41(1):21–39, 2002.