

Universidad de Málaga
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación
Programa de Doctorado en Ingeniería de Telecomunicación



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

TESIS DOCTORAL
Interacción 3D con objetos complejos

Autor:

DANIEL GONZÁLEZ TOLEDO

Directores:

LUIS MOLINA TANCO


ARCADIO REYES LECUONA

Abril 2024



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Daniel González Toledo

 <https://orcid.org/0000-0002-2698-2896>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

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





DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña DANIEL GONZÁLEZ TOLEDO

Estudiante del programa de doctorado INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: INTERACCIÓN 3D CON OBJETOS COMPLEJOS

Realizada bajo la tutorización de LUIS MOLINA TANCO y dirección de LUIS MOLINA TANCO Y ARCADIO REYES LECUONA (si tuviera varios directores deberá hacer constar el nombre de todos)

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 30 de MAYO de 2024

Fdo.: DANIEL GONZÁLEZ TOLEDO Doctorando/a	Fdo.: LUIS MOLINA TANCO Tutor/a
Fdo.: LUIS MOLINA TANCO Y ARCADIO REYES LECUONA Director/es de tesis	



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

INFORME DE ARTICULOS EN COAUTORIA

El tutor D. Luis Molina Tanco y los directores D. Luis Molina Tanco y Arcadio Reyes Lecuona de la tesis doctoral titulada “*INTERACCIÓN 3D CON OBJETOS COMPLEJOS*” elaborada por D. Daniel González Toledo, en la modalidad de monografía

DECLARAN QUE:

Ninguna de las publicaciones presentadas en coautoría como aval de esta tesis ha sido utilizada en tesis anteriores.

En Málaga a 30 de MAYO de 2024

Fdo.: LUIS MOLINA TANCO
Tutor

Fdo.: LUIS MOLINA TANCO y ARCADIO REYES LECUONA
Directores de tesis



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

A mi familia.

Decía Bernardo de Chartres que somos como enanos a los hombros de gigantes. Podemos ver más, y más lejos que ellos, no por alguna distinción física nuestra, sino porque somos levantados por su gran altura.

Juan de Salisbury, Metalogicon (1159)



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Agradecimientos

Me gustaría empezar agradeciendo profundamente a mis directores de tesis, Arcadio Reyes Lecuona y Luis Molina Tanco, por la oportunidad que me dieron de unirme al grupo de investigación y poder participar en distintos proyectos europeos. Su guía, confianza y apoyo a lo largo de estos años han sido fundamentales durante mis estudios de doctorado. Su generosidad al compartir su conocimiento y experiencias, han enriquecido enormemente mi formación académica y profesional.

Quiero expresar un agradecimiento especial y entrañable a María Cuevas. Por su constante apoyo en las decisiones importantes, su enfoque y positividad inquebrantables. Lo que comenzó como una relación de trabajo ha evolucionado hacia una amistad para toda la vida, y estoy profundamente agradecido por su presencia y apoyo incondicional.

A Phil Newcombe, mi Sensei, allí donde este, mi más sincero agradecimiento por todo lo que me enseñó. Sus enseñanzas trascendieron el ámbito físico y moldearon mi carácter y mi forma de enfrentar los desafíos de la vida. Sin él, no sería la persona que soy hoy.

Por último, pero no menos importante, quiero dedicar un agradecimiento especial y cariñoso a mi familia. A mis padres, Nicolás y María, les debo un profundo reconocimiento por su inquebrantable apoyo y la sólida educación que me han brindado desde mi infancia. Su amor y dedicación han sido el motor que impulsó mi camino y estoy eternamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Imposible expresar todo el amor que siento por ellos.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Índice

Resumen	15
Summary	17
Acrónimos.....	19
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación	2
1.2 Contexto	4
1.3 Objetivos de la Investigación	6
1.4 Estructura del documento.....	7
2 Importancia del eje en la rotación de objetos tridimensionales.....	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Estado del arte: Técnicas de Virtual Trackballs	11
2.3 Tesis.....	15
2.4 Estudio experimental	18
2.4.1 Introducción	18
2.4.2 Hipótesis.....	19
2.4.3 Metodología de evaluación.....	19
2.4.4 Material y métodos.....	21
2.4.5 Recogida y análisis de datos	28
2.4.6 Resultados	30

2.4.7	Discusión.....	45
2.5	Conclusiones	50
3	Navegación elipsoidal.....	53
3.1	Introducción	53
3.2	Navegación esferoïdal	57
3.2.1	Formulación Teórica.....	57
3.2.2	Decisiones de diseño.....	68
3.2.3	Cálculos dinámicos de la posición de la cámara ...	85
3.2.4	Limitaciones y desafíos	122
3.3	Navegación elipsoidal	131
3.3.1	Formulación Teórica y decisiones de diseño.....	132
3.3.2	Fundamentos de la navegación	151
3.3.3	Cálculos dinámicos de la posición de la cámara..	155
3.4	Evaluación.....	160
3.4.1	Introducción.....	160
3.4.2	Hipótesis	161
3.4.3	Material y métodos	161
3.4.4	Recogida y análisis de datos	167
3.4.5	Resultados.....	169
3.4.6	Discusión.....	173
3.5	Conclusiones	177
4	Gestión de oclusiones.....	181
4.1	Introducción	181
4.2	Trabajos previos	183
4.3	Propuesta	193

4.4	Selección jerárquica	196
4.5	Eliminación y Aislamiento	201
4.6	Transparencia adaptativa	203
4.7	Vistas explotadas	210
4.8	Conclusiones.....	216
5	Propuesta de Modelo	221
5.1	Introducción	221
5.2	Trabajos previos.....	223
5.3	Propuesta.....	226
5.4	Modelo jerárquico de componentes.....	228
5.4.1	Relación entre modelos	232
5.5	Modelo de interacción 3D.....	234
5.6	Conclusiones.....	239
6	Conclusiones.....	243
6.1	Contribuciones	245
6.2	Trabajos futuros.....	248
6.3	Lista de publicaciones	249
6.3.1	Revistas	249
6.3.2	Capítulos de libros.....	249
6.3.3	Congresos Internacionales.....	250
6.3.4	Otras publicaciones no relacionadas directamente con el tema del doctorado.....	250
6.4	Otras actividades de investigación	253
6.5	Proyectos	253

A Formularios y autorizaciones del comité ético.....	255
A.1 Estudio experimental sobre la importancia de la selección del eje de rotación	255
A.1.1 Consentimiento informado	255
A.1.2 Hoja informativa entregada a los participantes...	257
A.1.3 Cuestionario demográfico	259
A.1.4 Cuestionario de fatiga	260
A.1.5 Solicitud al comité ético.....	262
A.1.6 Aprobación del comité ético.....	268
A.2 Evaluación de la navegación esferoidal.....	270
A.2.1 Consentimiento informado	270
A.2.2 Hoja informativa entregada a los participantes...	272
A.2.3 Cuestionario demográfico	274
A.2.4 Solicitud al comité ético.....	275
A.2.5 Aprobación del comité ético.....	281
Bibliografía.....	285

Resumen

En la actualidad, las aplicaciones 3D van más allá de la creación y exploración de mundos virtuales para el entretenimiento, siendo utilizadas en campos como la ingeniería, la arquitectura o la medicina. El objetivo de esta tesis es profundizar en el estudio de los sistemas empleados para visualizar, analizar y relacionar sistemas complejos. Estos son sistemas que poseen múltiples partes interrelacionadas y geometrías complicadas, como motores, dispositivos móviles o modelos anatómicos. La interacción con estas aplicaciones ha evolucionado en las últimas décadas, pero sigue dominada por dos dispositivos omnipresentes: el ratón y las pantallas táctiles.

Esta tesis se propone mejorar la usabilidad en la interacción tridimensional con objetos complejos, centrándose especialmente en el uso de dispositivos con pocos grados de libertad, como el ratón y las pantallas táctiles. El desafío es optimizar la experiencia de usuario en este contexto específico. Para iniciar esta investigación, se exploraron variantes de las técnicas clásicas de *virtual trackball*, considerando la pertinencia de elegir un eje fijo que fuera intrínsecamente relevante al objeto tridimensional. Nuestros estudios mostraron que de esa forma se podía mejorar la inspección de objetos virtuales. A partir de esta premisa, se desarrollaron distintas técnicas basadas en elipsoides con el fin de facilitar la interacción con objetos tridimensionales complejos con formar tanto alargadas como aplanadas.

Estas técnicas abarcaron desde la navegación esférica hasta la elipsoidal, generalizaciones de la *virtual trackball* esférica tradicional, que demostraron mejoras sustanciales en la eficiencia y la percepción de usabilidad al examinar áreas laterales y secciones ocultas de los

objetos virtuales. Se exploraron y desarrollaron diversas estrategias para afrontar la visualización de partes ocultas en objetos 3D, desde métodos jerárquicos de selección hasta herramientas como eliminación, aislamiento, transparencia adaptativa y vistas explotadas. Cada una de estas estrategias presenta sus propias ventajas y limitaciones, pero la integración de estas técnicas ofrece una solución más completa para resolver situaciones de oclusión, abriendo un espectro amplio de posibilidades para la interacción con estos objetos complejos.

Además de las estrategias específicas para la gestión de oclusiones, se propusieron modelos de datos estructurados: un modelo jerárquico de componentes, un modelo de interacción 3D y un modelo de gestión de oclusiones. Estos modelos, diseñados para organizar y procesar información de sistemas complejos, tienen también como finalidad mejorar la usabilidad y adaptabilidad de las técnicas de interacción.

En conjunto, la integración de estas estrategias, modelos y técnicas proporciona un marco estructurado y versátil para mejorar la usabilidad y la interacción en entornos 3D, especialmente en sistemas complejos. Estos enfoques fueron sometidos a evaluaciones y pruebas en proyectos de investigación, demostrando su adaptabilidad y fiabilidad en diversos contextos, desde aplicaciones industriales hasta entornos web, móviles y autónomos.

Summary

Nowadays, 3D applications go beyond the creation and exploration of virtual worlds for entertainment, being used in fields such as engineering, architecture, or medicine. The aim of this thesis is to study the systems used to visualise, analyse, and relate complex systems. These are systems that have multiple interrelated parts and complicated geometries, such as motors, mobile devices, or anatomical models. Interaction with these applications has evolved over the last decades but is still dominated by two ubiquitous devices: the mouse and touch screens.

This thesis aims to improve the usability of three-dimensional interaction with complex objects, with a special focus on the use of devices with few degrees of freedom, such as the mouse and touch screens. The challenge is to optimise the user experience in this specific context. To initiate this research, variants of classical virtual trackball techniques were explored, considering the relevance of choosing a fixed axis that is intrinsically relevant to the three-dimensional object. Our studies showed that the inspection of virtual objects could be improved in this way. Based on this premise, different ellipsoid-based techniques were developed to facilitate the interaction with complex three-dimensional objects with both elongated and flattened shapes.

These techniques ranged from spheroidal to ellipsoidal navigation, generalisations of the traditional spherical virtual trackball, which demonstrated substantial improvements in efficiency and perceived usability when examining side areas and hidden sections of virtual objects. Various strategies were explored and developed to address the visualisation of hidden parts in 3D objects, ranging from

hierarchical selection methods to tools such as deletion, isolation, adaptive transparency and exploded views. Each of these strategies has its own advantages and limitations, but the integration of these techniques offers a more complete solution for solving occlusion situations, opening a wide spectrum of possibilities for interacting with these complex objects.

In addition to specific strategies for occlusion management, structured data models were proposed: a hierarchical component model, a 3D interaction model and an occlusion management model. These models, designed to organise and process information from complex systems, are also intended to improve the usability and adaptability of interaction techniques.

Together, the integration of these strategies, models and techniques provides a structured and versatile framework for improving usability and interaction in 3D environments, especially in complex systems. These approaches were evaluated and tested in research projects, demonstrating their adaptability and reliability in a variety of contexts, from industrial applications to web, mobile and autonomous environments.

Acrónimos

AEC	Architecture, Engineering & Construction
APS	Actor-Product-Service model
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer-Aided Design
DoF	Degrees of Freedom
GUI	Graphical User Interface
HCI	Human-Computer Interaction
MBSE	Model-based systems engineering
PLUGGY	The Pluggable Social Platform for Heritage Awareness and Participation. Proyecto de investigación financiado por la Unión Europea.
PoI	Point-of-Interest
RV	Realidad Virtual
SysML	System Modeling Language
TAV	Two-Axis Valuator Technique
UiW	Use-it-Wisely. Proyecto de investigación financiado por la Unión Europea.
UML	Unified Modeling Language



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Capítulo 1

Introducción

El diseño de interfaces de usuario 3D es un campo interdisciplinario que se nutre de diversas áreas, al igual que la interacción persona-ordenador (HCI), y abarca una amplia gama de temas. La evolución histórica de las interfaces gráficas de usuario (GUI) ha sido notable: antes de 1980, la interacción con los ordenadores prácticamente sólo se basaba en comandos de texto; sin embargo, con la maduración de tecnologías como el ratón y las pantallas gráficas rasterizadas, surgió la primera generación de interfaces gráficas, marcando un cambio significativo en la investigación de HCI.

En 1979, en un trabajo pionero, Thornton presenta la *Number Wheel* (Thornton, 1979a), una propuesta innovadora para manipular objetos 3D que asociaba diferentes grados de libertad del dispositivo a parámetros de la visualización 3D como los ángulos de rotación de los objetos. Aún hoy, más de cuatro décadas después, sigue siendo la base de muchos interfaces 3D que usan dispositivos con pocos grados de libertad como el ratón o las pantallas táctiles. Sin embargo, a pesar del tiempo transcurrido, aún persisten desafíos en los interfaces que usan este tipo de dispositivos que necesitan ser abordados. Esta tesis intenta abordar dichos desafíos pendientes y contribuir a los interfaces 3D con pocos grados de libertad, especialmente cuando se interactúa con objetos complejos.

1.1 Motivación

En las últimas décadas, la interacción con modelos tridimensionales ha adquirido una especial relevancia en diversas aplicaciones para la ingeniería, la arquitectura, la medicina o el entretenimiento digital. Los avances en capacidad y ubicuidad de dispositivos electrónicos, como computadoras, teléfonos móviles o tabletas, ha generado un interés y un volumen de negocio propicios para la innovación en las empresas y grupos de investigación del sector 3D.

Las áreas como el diseño industrial, el mantenimiento de sistemas o la arquitectura, y la formación especializada en estos sectores, presentan necesidades específicas, tales como visualizar con detalle las partes que componen los objetos virtuales, o extraer información del diseño o del estado de estas partes, almacenada en bases de datos relacionadas con su geometría.

En estos contextos, decimos que los objetos virtuales son complejos y nos referiremos a ellos como *productos complejos*; complejos por el doble motivo de que se componen de múltiples partes jerárquicamente relacionadas y de que poseen geometrías intrincadas donde algunas partes ocultan a otras, creando áreas de acceso complicado. Ejemplos de estos productos complejos pueden ser un motor, una turbina de gas, un teléfono móvil, un satélite de comunicaciones, un modelo anatómico o una estructura metálica, entre otros.

En muchas de las aplicaciones actuales en las que se interactúa con este tipo de objetos, la representación 3D ya no constituye el fin, sino una parte integral de un sistema mayor. El modelo de un producto comprenderá no solo un conjunto de piezas modeladas tridimensionalmente, sino también una estructura jerárquica de datos que va a contener información relevante sobre la relación entre los

componentes, el ensamblaje, parámetros de fabricación y funcionamiento, resultados de inspecciones y de simulaciones, etc. Toda esta información, fundamental para el contexto de la aplicación y del producto, va a requerir estar vinculada a las distintas partes específicas del mismo.

Este escenario plantea numerosos desafíos para la interacción, que requieren soluciones innovadoras. Será necesario poder seleccionar diferentes partes del producto para obtener o para introducir información sobre ellas, para comprender su funcionamiento o ver cómo interactúa con sus partes vecinas o simplemente para localizarlas. Para poder obtener información de cada pieza o ver cómo se relacionan las piezas entre sí, será necesario disponer de modelos que almacenen tanto información jerárquica como cualquier otro tipo de datos a visualizar. Para poder seleccionar las diferentes partes es necesario resolver como seleccionar aquellas partes que no son visibles a simple vista, porque están ocultas por otras, lo que expone la necesidad de implementar mecanismos para resolver las oclusiones.

Las soluciones que se alcancen deberán adaptarse también a las limitaciones de los dispositivos de interacción empleados de forma habitual en el ámbito industrial, como ordenadores o dispositivos móviles. Estos tienen en común que utilizan mecanismos de interacción con escasos grados de libertad, como ratones o pantallas táctiles. Interactuar con objetos 3D complejos con dispositivos con reducidos grados de libertad es un reto que no tiene solución trivial.

Esta investigación surge de la necesidad de abordar y superar estos desafíos, buscando mejorar y desarrollar métodos innovadores para la interacción con modelos 3D complejos mediante el uso de dispositivos con pocos grados de libertad. La motivación principal radica en la creciente demanda de herramientas más eficientes y accesibles que permitan a los usuarios interactuar con entornos tridimensionales de

manera más natural y fluida, y por tanto más eficaz y menos fatigosa. Esta demanda surge no solo de profesionales en campos técnicos y científicos, sino también del público en general que busca aplicaciones más intuitivas para explorar y manipular objetos 3D.

1.2 Contexto

Esta tesis doctoral se ha desarrollado en el seno del grupo de investigación DIANA del departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga, como resultado de la participación en dos proyectos de investigación financiados por la Unión Europea: *Use-It-Wisely*¹ y *PLUGGY*².

El origen de esta investigación es el proyecto *Use-It-Wisely*, en cuyo consorcio participaban empresas de diversas industrias, pero todas vinculadas a productos de larga vida útil: aquellos que demandan grandes inversiones y de los que se producen muy pocas unidades. En particular, nuestra participación se centró en el desarrollo de una herramienta web colaborativa en 3D para mejorar los procesos de toma de decisiones en la inspección y mantenimiento de turbinas de producción de energía. Durante las fases iniciales, al evaluar los primeros modelos utilizando herramientas de visualización estándar, percibimos que la navegación por el modelo de la turbina resultaba poco natural. Este hallazgo condujo a la implementación de una técnica de interacción que fijase un eje de rotación horizontal, coherente con el modelo mental que los usuarios tenían de la turbina, en los prototipos de nuestra herramienta. Esta decisión, bien recibida por los operarios de inspección de mantenimiento que evaluaron la

¹ <https://cordis.europa.eu/project/id/609027>

² <https://www.pluggy-project.eu/>

herramienta, fue el motor que impulsó nuestra indagación sobre la posibilidad de generalizar este resultado.

Los objetivos fundamentales de esta herramienta colaborativa incluían el acceso visual a información de una base de datos vinculada a la geometría 3D y la capacidad de introducir información y tomar decisiones apoyadas en esta geometría, todo ello empleando dispositivos de oficina estándar, como ordenadores personales con ratón y teclado. Estos objetivos motivaron la necesidad de estudiar e implementar técnicas de selección jerárquica, gestión de oclusiones y representación de información sobre modelos tridimensionales.

Al concluir el proyecto *Use-It-Wisely*, decidimos continuar la investigación, centrándonos en las áreas de técnicas de interacción y gestión de oclusiones, conservando el objetivo de adaptar estas técnicas al conocimiento del sistema proporcionado por los modelos. Esta decisión estuvo respaldada por el seguimiento de la evolución de la industria hacia un modelado unificado para sus productos.

Como primer paso para continuar esta investigación, independizamos los algoritmos desarrollados de la aplicación del proyecto, lo que dio origen al visor de productos complejos *HOM3R* (*Hierarchical prOduct Model 3d vieweR*). A partir de este punto, comenzó un proceso de generalización y formalización de los algoritmos de interacción, antes específicos para el modelo 3D del proyecto *Use-It-Wisely*, para que pudieran funcionar con distintos tipos de objetos 3D.

La participación en el proyecto de investigación *PLUGGY* nos permitió acceder a una diversidad de casos de uso con objetos 3D en un sector diferente, el del patrimonio cultural. Esto propició la evaluación y desarrollo de nuestras ideas. El proyecto *PLUGGY* también implicó la necesidad de que nuestras técnicas fueran capaces de operar en un entorno multiplataforma, incluyendo dispositivos

móviles, lo que conllevó un último refinamiento y validación de las mismas.

1.3 Objetivos de la Investigación

Como se ha expuesto, la posibilidad de explorar, manipular y comprender objetos en entornos 3D de manera intuitiva y eficiente es esencial para múltiples campos profesionales. Sin embargo, la interacción efectiva con estos modelos presenta desafíos considerables, incluyendo la complejidad en la navegación, la dificultad para manipular objetos complejos y la comprensión espacial limitada.

En este sentido, los objetivos iniciales de esta investigación abarcaban diversas áreas. Se buscaba desarrollar estrategias de interacción innovadoras que mejorasen la usabilidad y la eficiencia en la manipulación de modelos 3D. Además, se pretendía evaluar y comparar la efectividad de estas estrategias en términos de facilidad de uso, aprendizaje y rendimiento. El esfuerzo se orientó hacia el desarrollo de técnicas de selección jerárquica de componentes y gestión de oclusiones adaptadas a *entornos de oficina* que emplean dispositivos con pocos grados de libertad, como ratón o pantallas táctiles. En todo momento se priorizó la consideración de principios de ergonomía cognitiva y de diseño para mejorar la experiencia del usuario y la usabilidad. El objetivo último es aportar al campo de la interacción 3D métodos innovadores y prácticos aplicables en diversos contextos y aplicaciones.

Estos objetivos se tradujeron en los siguientes logros, orientados todos a operar con dispositivos de interacción de bajo costo:

1. Un nuevo paradigma para las técnicas de interacción, donde se ha confirmado que la selección adecuada de un eje fijo al

diseñar una técnica de interacción podría mejorar las tareas de inspección al hacer la navegación más natural.

2. El desarrollo de dos técnicas de interacción basadas en elipsoides virtuales, ampliando la familia de técnicas de *Virtual Trackball*.
3. La creación de algoritmos de selección jerárquica y gestión de oclusiones, basados no solo en información geométrica, sino también en datos contenidos en el modelo del sistema.
4. La propuesta de una estructura de modelos de sistemas que se fundamenta en un árbol jerárquico de componentes, buscando integrar información proveniente de distintos tipos de modelados y datos de interacción, con el propósito de lograr una interacción 3D adaptada a modelos específicos.

1.4 Estructura del documento

La estructura de esta tesis doctoral se compone de seis capítulos, visualizados en la Figura 1. El primer capítulo corresponde a la presente introducción. En el segundo capítulo, se lleva a cabo un análisis exhaustivo del estado del arte en cuanto a la interacción con modelos 3D, resaltando técnicas previas, enfoques y desafíos identificados en la literatura. Posteriormente, se propone y estudia la posibilidad de mejorar las tareas de inspección mediante la correcta selección de un eje fijo al diseñar una técnica de interacción.

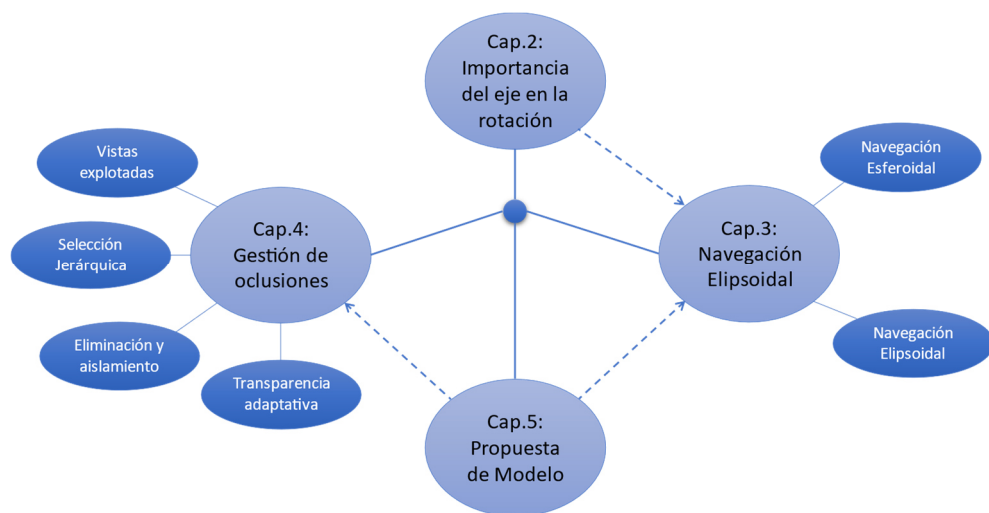


Figura 1. Diagrama de la estructura de esta Tesis doctoral.

El tercer capítulo recoge los resultados obtenidos en el capítulo previo y presenta dos nuevas técnicas de interacción que consideran el eje prioritario del objeto. Estas técnicas se basan en elipsoides virtuales y representan una extensión de la familia de técnicas de *Virtual Trackball*.

El cuarto capítulo se centra en un estudio exhaustivo del estado del arte en gestión de oclusiones y propone cuatro técnicas (Eliminación y Aislamiento, Selección jerárquica, Transparencia adaptativa y Vistas explotadas) enfocadas en su aplicación en sistemas que emplean dispositivos de interacción de bajo costo.

Por otra parte, el quinto capítulo introduce nuestra propuesta de un modelo integrativo destinado a la industria, el cual integra información relevante para la interacción y busca capturar las últimas tendencias en ingeniería de sistemas basada en modelos.

Finalmente, el sexto capítulo aborda las conclusiones extraídas de la investigación, ofreciendo también posibles direcciones futuras para el desarrollo y la aplicación de estas estrategias.

Capítulo 2

Importancia del eje en la rotación de objetos tridimensionales

2.1 Introducción

La interacción tridimensional (3D) es una tarea importante en muchas aplicaciones en las que el usuario tiene que tratar con objetos o escenas virtuales. Una tarea de interacción 3D muy común en varios campos de aplicación (como el modelado, el diseño asistido por ordenador, la medicina o la navegación por repositorios de objetos 3D), es la inspección de un objeto virtual. Esta tarea permite a los usuarios examinar distintas zonas del objeto desde diferentes perspectivas con el propósito de inspeccionarlas y/u obtener información de ellas.

En las aplicaciones de Realidad Virtual (RV), la tarea de inspección puede resolverse de dos maneras diferentes, o bien mediante una *tarea de navegación alrededor* del objeto o bien mediante una *tarea de manipulación*, rotando el objeto. La primera de ellas consiste en mantener el objeto fijo y permitir al usuario mover el punto de vista orbitando alrededor del objeto y mirándolo. Por otro lado, la tarea de manipulación permite al usuario rotar el objeto y por tanto cambiar su orientación.

Ambas acciones, orbitar alrededor y rotar, son equivalentes desde el punto de vista de la imagen renderizada, pero aun así existen algunas

diferencias en el modelo mental¹ del usuario que son relevantes para la interacción (Norman, 1983). Si el objeto está situado en el suelo, como en el caso de los edificios, el modelo mental del usuario será coherente con una tarea de navegación de vista alrededor, y los movimientos se percibirán como movimientos de la cámara, mientras que el objeto se percibirá como fijo en el mundo. En cambio, cuando el objeto se presenta sin referencia al suelo, suspendido en un espacio vacío, los movimientos pueden percibirse como manipulación del objeto, mientras que la cámara se percibiría como fija en el mundo. En todo caso, es necesario diferenciar entre el modelo mental del usuario, a lo que nos referimos aquí, y la implementación de la técnica. Es factible implementar una técnica de órbita, lo que implica mover la cámara en el mundo virtual, y lograr que el usuario perciba el renderizado como si fuese el objeto el que estuviera rotando.

A lo largo del tiempo se han propuesto técnicas de interacción, para ambos casos, que mapean las acciones del usuario en los comandos necesarios para realizar estas tareas. Algunas de estas técnicas proponen la utilización de dispositivos de entrada estándar, otras la utilización de dispositivos específicos, como son *game-pads* o reconocimiento de gestos (Hand, 1997). Sin embargo, en el contexto de las aplicaciones de escritorio, y más concretamente en las aplicaciones basadas en web, existe una limitación al uso de dispositivos específicos para la interacción, reduciéndose éstos a teclado y ratón, lo que proporciona grados de libertad (DoF) limitados. Una situación similar se da en aplicaciones dentro de dispositivos portátiles (*smartphones* y tabletas), donde la interacción normalmente se tiene que realizar utilizando la pantalla táctil, de nuevo con DoF limitados.

¹ El concepto de modelos mentales se refiere a las representaciones internas y simplificadas que las personas construyen en sus mentes para comprender y manejar el mundo que les rodea. Estos modelos mentales influyen en la forma en que interpretamos la información, tomamos decisiones y realizamos acciones.

En los estudios realizados en esta tesis, nos centraremos en la inspección de objetos 3D mediante ratón y pantallas táctiles, restringiendo la entrada del usuario a dos DoF, proporcionados por gestos del ratón o de los dedos sobre la pantalla como gestos horizontales (Δx) y verticales (Δy).

2.2 Estado del arte: Técnicas de Virtual Trackballs

En un primer estudio, Chen et al. (1988a) propusieron la técnica de la esfera virtual (*Virtual Sphere*), también conocida como *Virtual Trackball*, para la rotación 3D de objetos utilizando dispositivos 2D. Su propuesta consistía en simular una esfera virtual que puede girarse alrededor de cualquier eje arbitrario. El objeto o escena 3D que se desea rotar puede verse como encapsulado en esta esfera. Para rotar el objeto, el usuario tiene que hacer rodar la esfera pulsando sobre su superficie y moviendo el ratón en la dirección deseada. Por tanto, el eje de rotación es perpendicular a la dirección del movimiento sobre la superficie de la esfera. En el documento original, la esfera virtual se dibujaba en la pantalla como un círculo y, cuando el ratón se movía fuera de él, el objeto giraba alrededor del eje z (normal a la pantalla). Como alternativa, en los dispositivos táctiles (en los que la entrada se realiza mediante gestos con los dedos) este tipo de técnicas pueden adaptarse fácilmente tratando una entrada táctil como una entrada de ratón, como se muestra por ejemplo en los trabajos de Besançon et al. (2017a), Declé & Hachet (2009), Kratz & Rohs (2010) y Yu et al. (2010)

Una versión mejorada de esta la técnica original de *Virtual Sphere* fue propuesta por Bell (1998) (citada y descrita en (Bade et al., 2005a; Henriksen et al., 2004a)). En esta variación, los gestos del usuario no se proyectan sobre la esfera virtual, sino sobre una combinación de esfera e hipérbola, con lo que se consiguen unos movimientos más suaves.

Otra variación similar al clásico *Virtual Trackball* es la técnica conocida como ArcBall, propuesta por Shoemake (1992, 1994). En este caso, los gestos se proyectan sobre la superficie de la esfera virtual, como en la versión original, pero el eje de rotación se elige de forma que la entrada del ratón, o táctil, parece permanecer unida al mismo punto de la esfera virtual. Así se consiguen rotaciones transitivas, es decir, aquellas en las que la orientación resultante sólo depende de las posiciones inicial y final de la entrada, lo cual es deseable.

Todas estas técnicas son especialmente adecuadas para manipular objetos suspendidos en un espacio vacío sin referencia al suelo. De hecho, la metáfora del *trackball* sugiere que las acciones del usuario hacen girar el objeto en lugar de hacer orbitar la cámara. Como se observa, todas ellas son variaciones de la misma idea del *Virtual Trackball* y permiten rotar el objeto alrededor de los tres ejes.

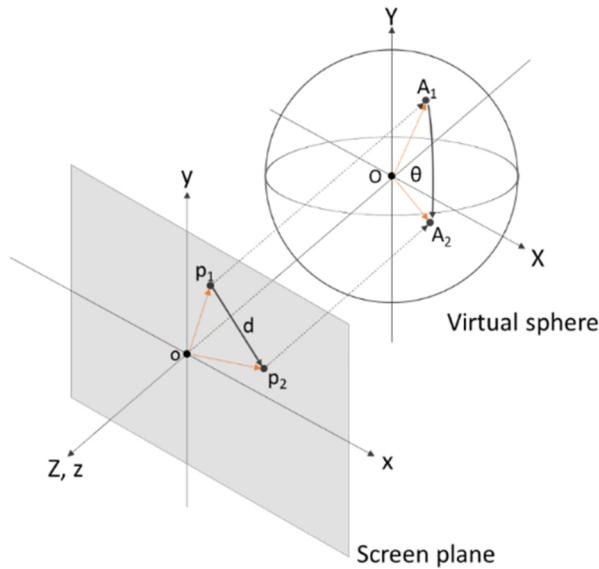


Figura 2. Técnica de *Virtual Trackball* clásica, un gesto del dispositivo entre los puntos p_1 y p_2 de la pantalla se mapea en una rotación de la esfera del punto A_1 al punto A_2 . Imagen reproducida de Henriksen et al., 2004b).

Existe otra técnica más sencilla, mencionada en el trabajo de Chen como *Two-Axis Valuator Technique* (TAV). La primera idea fue propuesta incluso antes por Thornton (1979b) y fue la base de otra técnica posterior propuesta por Evans et al. (1981), que también es comparada en el trabajo de Chen con la *Virtual Sphere*. A pesar de su antigüedad, la técnica TAV se ha utilizado en múltiples aplicaciones y sigue siendo hoy en día una de las más usadas. Quizás esto se deba a su simplicidad, ya que consiste en mapear directamente los gestos del usuario en coordenadas X e Y del dispositivo en rotaciones alrededor de los ejes vertical y horizontal en el objeto 3D.

El clásico TAV considera rotaciones alrededor de los ejes globales X e Y, sin embargo, en aquellas aplicaciones en las que los objetos se colocan sobre una superficie horizontal, el eje vertical podría considerarse como una referencia y dejarse fijo durante las tareas de inspección. Este es el caso de herramientas de modelado 3D como son Blender Blender Foundation, 2015), 3D Max (Autodesk, 2012), SketchUp (Google SketchUp, 2019) o algunas tiendas web de objetos 3D como 3D Warehouse (Official Google, 2016) o (Sketchfab, 2019).

Al tener el suelo como referencia, es decir el eje vertical fijo, ahora la que mejor funciona es la metáfora de cámara orbitando, en la que la escena está fija y el punto de vista orbita a su alrededor. Esta técnica se conoce como *TAV with fixed Up-vector* (Bade et al., 2005a) o simplemente *Trackball fijo* (Rybicki et al., 2016), y también proporciona rotaciones transitivas, como la ArcBall.

La técnica TAV con *Up-vector* fijo puede ser explicada también utilizando el concepto de una esfera virtual que envuelve completamente la escena o el objeto 3D. A diferencia de las técnicas de *Virtual Trackball*, los puntos de la pantalla no se mapean directamente a puntos de la esfera virtual, sino que el desplazamiento en cada uno de los ejes de la pantalla se asigna a rotaciones en el mundo tridimensional. De tal forma que, el punto de vista orbita por toda la superficie de una esfera centrada en el

punto al que mira la cámara, y utilizando coordenadas esféricas polares, los movimientos horizontales del dispositivo son mapeados en azimut, y los verticales en elevación.

En un caso particular, en que se considere que el eje X local al objeto gira alrededor del Y cuando hay gestos horizontales, en el TAV con *Up-vector* fijo los movimientos en el eje vertical de la pantalla (el eje \tilde{y}), se mapean como rotaciones alrededor del eje X del mundo. Y los gestos horizontales en la pantalla se mapean como rotaciones alrededor del eje Y^1 local del objeto. Es decir, el eje vertical de rotación se queda fijo al eje vertical del objeto, de ahí el nombre.

Existe otra variación a la técnica TAV, homologa a la anterior, en la que ahora los gestos horizontales del dispositivo en la pantalla (eje \tilde{x}) se mapearían en rotaciones alrededor del eje Y del mundo. Mientras que los gestos verticales, eje y de la pantalla, se mapean como rotaciones alrededor del eje X local del objeto. De forma análoga a esta técnica se la conoce como TAV *with fixed Right-vector* (Buda, 2012), ya que en este caso es el eje horizontal local al objeto el que se queda fijo en las rotaciones.

En la Figura 3 se ilustra el mecanismo de funcionamiento de ambas variantes de TAV, con *Up-vector* fijo y con *Right-vector* fijo. Para ello se aplica un gesto desde un punto cualquiera de la pantalla $p1$ a otro $p2$. Esto produce una rotación de la esfera virtual que llevaría un punto arbitrario de la esfera A1 a la posición A2. En detalle para cada uno de los casos se tendría que:

- En el caso de *Up-vector fijo* es posible dividir el movimiento de $p1$ a $p2$ en dos: Δy , en color azul, que provoca una rotación $\Delta\Phi$ de la esfera alrededor del eje X global del mundo, cambiando la

¹ En esta tesis se considera que Y es eje vertical de la escena 3D.

orientación del eje Y local del objeto; y Δx , en color verde, que provoca una rotación $\Delta\theta$ de la esfera alrededor de su eje Y local.

- En el caso de *Right-vector* fijo Δy provoca una rotación de Δy alrededor del eje X local del objeto y Δx una rotación de $\Delta\theta$ alrededor del eje Y global del mundo.

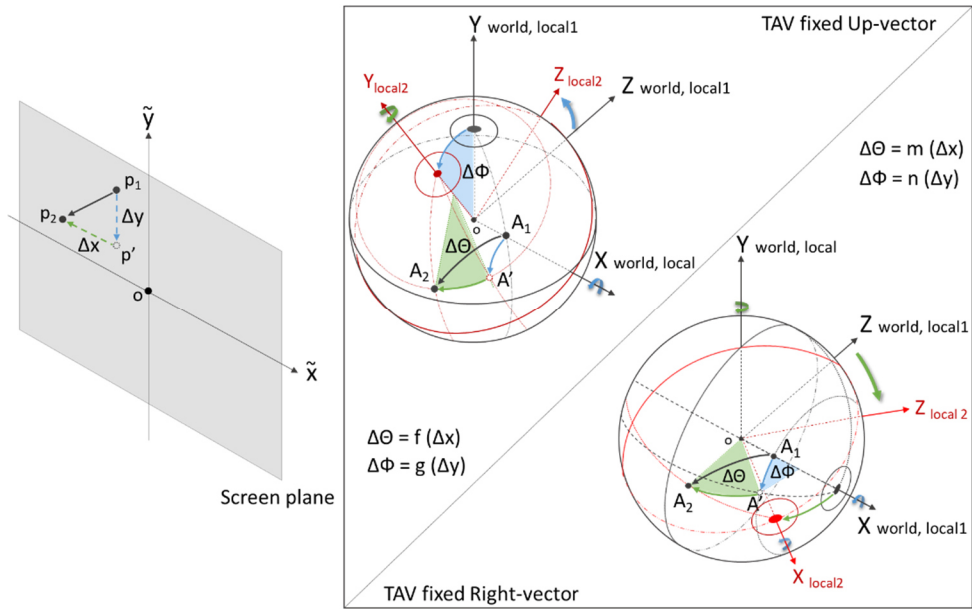


Figura 3. Ilustración de dos variantes de la técnica TAV con eje fijo. Estas técnicas de interacción transforman un gesto en el plano de la pantalla del dispositivo (izquierda) en una rotación 3D en el mundo virtual. (a) es el TAV con Up-vector fijo, en el que las rotaciones giran en torno a un eje X global, pero a un eje Y local; (b) es el TAV con Right-vector fijo, en el que las rotaciones giran en torno a un eje X local, pero a un eje Y global.

2.3 Tesis

En su trabajo, Norman (Massaro & Norman, 1990; Norman, 1983), analiza cómo los diseñadores pueden mejorar la usabilidad y la experiencia del usuario al comprender y adaptarse a los modelos mentales de los usuarios. Al interactuar con un sistema los usuarios se van a formar sus propios modelos mentales, los cuales estarán fundamentados

en la experiencia, el conocimiento previo y las características individuales como uno de ellos. Diseñar teniendo en cuenta estos modelos mentales puede mejorar la usabilidad y la experiencia del usuario.

En esta línea el objetivo de nuestro trabajo es diseñar sistemas de navegación que se alineen con los conocimientos, las expectativas y las experiencias previas que los usuarios tienen sobre los modelos tridimensionales. Al comprender y adaptarse a sus modelos mentales, se busca lograr una mayor facilidad de uso, una menor carga cognitiva y una experiencia de usuario más satisfactoria.

Si se toma como punto de partida la técnica conocida como TAV, se ha visto que el empleo del eje vertical como referencia fija es apropiado cuando hay suelo, se encuentra este explícitamente mostrado o no. Sin embargo, hay objetos cuyo eje de rotación intrínseco no tiene por qué ser el vertical. Ejemplos serían objetos que presentan una cierta simetría axial, como una turbina o una rueda, que suelen presentarse con el eje de rotación horizontal, ver Figura 4. Otro ejemplo un poco más complejo sería una representación del globo terráqueo en la que se presente un eje de rotación inclinado, que representa la inclinación de la rotación de la Tierra con respecto a la dirección perpendicular a la órbita alrededor del Sol.

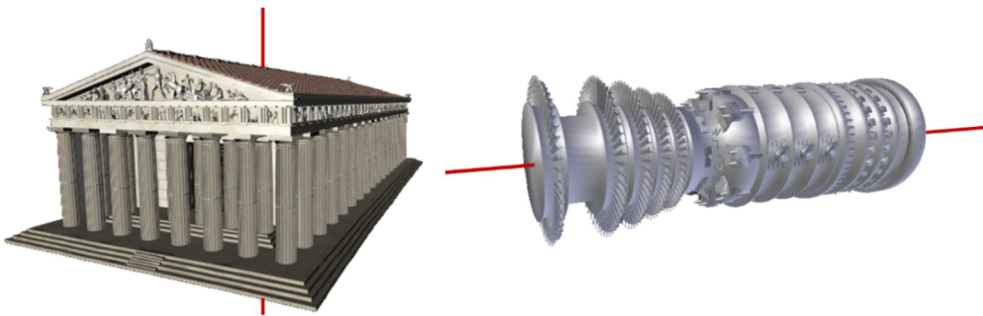


Figura 4. Objetos 3D con diferentes ejes de referencia para la rotación. A la derecha una turbina de gas con un eje de referencia horizontal y a la izquierda una reconstrucción del Partenón con eje de referencia vertical.

En todos esos casos, parece lógico pensar que el modelo mental del usuario incluirá de forma natural la posibilidad de girar el objeto alrededor de ese eje de rotación. *Diseñar una interfaz que se adapte y asuma cada uno de estos ejes como fijos podría mejorar la interacción, siguiendo los trabajos anteriores sobre modelos mentales e interfaces.*

Esta afirmación se apoya también en la teoría de esquemas¹ propuesta por Schmidt (Schmidt, 1975). En ésta, los esquemas son estructuras cognitivas que contienen información sobre cómo realizar una habilidad o tarea de manera efectiva. Estos esquemas se forman a través de la experiencia y la práctica repetida. Los esquemas son útiles porque permiten a las personas realizar una tarea de manera más eficiente. Al tener una representación mental clara de la habilidad, se reduce la necesidad de procesar información detallada en cada paso, lo que facilita la ejecución fluida y automática.

Cuando se enfrenta al sistema, cada usuario desarrollará un esquema mental propio. El usuario empezará a realizar acciones en la interfaz, que darán lugar a respuestas por parte del sistema. Estas respuestas retroalimentan al usuario, que las comparará con el comportamiento esperado del sistema y le permiten corregir la acción realizada. En este proceso se va construyendo el esquema motor necesario para la tarea. Cuanto más similares sean la respuesta esperada y la real del sistema, menos correcciones serán necesarias en la interacción.

Nuestra tesis es que, si hacemos coincidir el eje fijo de la técnica TAV con el eje de rotación intrínseco del objeto, el comportamiento de la interfaz coincidirá con el esperado por los esquemas previos del usuario,

¹ La teoría de los esquemas propuesta por Richard Schmidt en 1975 es un marco teórico utilizado en el ámbito del aprendizaje motor y la adquisición de habilidades. Esta teoría se centra en la idea de que las personas desarrollan representaciones cognitivas llamadas "esquemas" para organizar y procesar la información relevante durante la realización de una tarea específica.

lo que facilitará el desarrollo de estos esquemas para esta interacción y, por consiguiente, se mejorará la usabilidad.

Para confirmar esta hipótesis se realizó un estudio experimental que se va a detallar a continuación, que fue publicado en (Gonzalez-Toledo et al., 2022a). Aunque una implementación genérica debería permitir fijar cualquier eje, este trabajo no ha llegado tan lejos. Se ha investigado la importancia de seleccionar qué eje fijar, en función de las características intrínsecas del objeto a inspeccionar, para objetos con rotación intrínseca tanto vertical como horizontal.

2.4 Estudio experimental

2.4.1 Introducción

Este estudio se centra en objetos suspendidos en un espacio vacío, donde el eje natural del objeto va a depender del modelo virtual que se esté representando. El estudio pretende demostrar que, si el eje intrínseco del objeto coincide con el eje fijado en la técnica de interacción, mejorará la interacción. Ya que coincidirá con el modelo mental del usuario y, por tanto, será más natural. Por el contrario, cuando existe una incoherencia entre ambos ejes, la interacción, y por tanto la experiencia del usuario, se verá dificultada. Además, esto debería ocurrir independientemente del dispositivo que utilicemos, ya que está relacionado con la coherencia entre el modelo mental del usuario y la técnica de interacción, no con las características específicas de los dispositivos de interacción. Por este motivo en el estudio se emplearon dos dispositivos distintos: ratón y pantalla táctil.

Para poder llevar a cabo este estudio esto se desarrolló un sistema de navegación TAV con eje fijo que podía ser vertical (Up-vector) u horizontal (Right-vector). Es decir, en función del objeto se cambiaba la correspondencia entre los gestos y el eje de rotación.

Por lo que sabemos, muy pocos estudios se han centrado en TAV con eje fijo. El único estudio de cierta profundidad es el de Bade et al. (2005a) en el caso de un Up-Vector fijo. Por otro lado, la comparación entre diferentes ejes fijados ha sido abordada por Buda (2012a) para teléfonos móviles, pero sin considerar ninguna característica intrínseca del objeto.

2.4.2 Hipótesis

En vista de todo lo anterior, nuestra hipótesis es que *tener coherencia entre ambos ejes, ya sea vertical u horizontal, beneficiará a la usabilidad general del sistema*. Lo que se reflejará de las siguientes maneras:

- (H1) Conducirá a un mayor rendimiento.
- (H2) Hará que los sujetos perciban un incremento de la usabilidad.
- (H3) Reducirá la carga de trabajo del sujeto al utilizar el sistema.

2.4.3 Metodología de evaluación

El objetivo es buscar diferencias en el rendimiento, la usabilidad y la carga de trabajo percibidas al utilizar distintas técnicas de rotación 3D. Existen en la literatura dos tipos de tareas para evaluar el rendimiento del usuario en este caso de uso: inspección y encaje de orientación (*matching*). La inspección consiste en rotar el objeto hasta una orientación determinada en la que se pueda realizar alguna acción específica o se acceda a una información concreta. El ajuste de orientación, por su parte, consiste en girar el objeto para conseguir una orientación específica presentada como modelo. El usuario tiene que decidir cuándo el objeto está correctamente orientado y confirmarlo con alguna acción, por lo que es posible evaluar tanto el tiempo como la precisión. Sin embargo, en las tareas de inspección, una vez que la orientación es adecuada para obtener la información, o el usuario es capaz de realizar la acción correspondiente, la tarea finaliza y se puede medir el tiempo empleado. Este tipo de tarea, por tanto, no permite

medir la precisión, y las mediciones de tiempo se encuentran libres de problemas relacionados con un compromiso entre velocidad y precisión.

Algunos estudios que han empleado tareas de ajuste de orientación para comparar técnicas de rotación son: (M. Chen et al., 1988b) que comparó la técnica original del *trackball* con la TAV, con la técnica de Evans (Evans et al., 1981), y con otras dos basadas en controles deslizantes (*sliders*); Jacob y Oliver que repitieron un estudio similar en el que se comparaban casi las mismas técnicas, pero añadiendo alguna tarea de inspección (contar el número de instancias de alguna característica específica en el objeto) (Jacob & Oliver, 1995); Rybicki que compara la TAV, la ArcBall y una tercera técnica basada en controles deslizantes, utilizando ambas, el ajuste de orientación y la inspección (Rybicki et al., 2016). Otros autores, como por ejemplo (Marton et al., 2014), han evaluado diferentes conjuntos de técnicas utilizando tanto tareas de inspección como de ajuste de orientación.

Por otra parte, otros estudios, más centrados en la evaluación del rendimiento, han utilizado tareas de inspección. Como Bade et al, que compararon el *trackball* de Bell, *ArcBall*, TAV y TAV con vector-Up fijo utilizando una tarea de inspección que consistía en rotar un objeto esférico de forma compleja sin ningún eje de rotación intrínseco, y que tenía unos objetivos en su superficie que el usuario tenía que encontrar. Una vez localizados los objetivos, el usuario tenía que girar el objeto para situar el objetivo en el centro de la pantalla y, a continuación, disparar al objetivo (Bade et al., 2005a).

Buda (2012), que comparó técnicas de TAV con diferentes ejes fijos (horizontal y vertical), también se centró en el rendimiento y utilizó diversas tareas de inspección, argumentando que las tareas de inspección complejas son más eficaces para descubrir los puntos débiles y fuertes de las técnicas de rotación. Ejemplos de tareas de inspección complejas son: la búsqueda de objetivos, el recuento, la estimación entre ellos, la

identificación y la relación espacial de los objetivos en la superficie de los objetos 3D.

2.4.4 Material y métodos

2.4.4.1 Diseño de la tarea

En vista de todo lo anterior se decidió que la mejor tarea para nuestro estudio sería una tarea de inspección que se va a explicar a continuación. Cada una de estas tareas de inspección implicaba manipular un objeto girándolo, y los participantes tenían que realizarlas repetidas veces, llamamos *trials* a cada una de ellas. El objeto utilizado en estas tareas era una esfera que presentaba veinte orificios cilíndricos en su superficie, como puede verse en la Figura 5a.

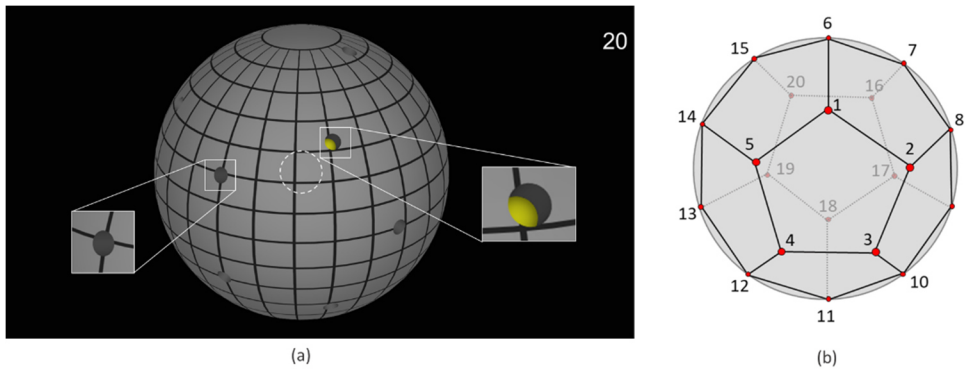


Figura 5. (a) Modelo 3D de la esfera texturizada con veinte agujeros utilizada en las tareas de inspección. (b) Vértices de un dodecaedro inscrito en la esfera. Los vértices del dodecaedro se utilizan para distribuir uniformemente los orificios en la esfera.

Los *trials* consistían en encontrar una esfera amarilla, *target*, que aparecía dentro de uno de los orificios. Para ello, los participantes debían girar la esfera buscando el *target* para, a continuación, situarlo dentro de una mirilla circular situada en el centro de la pantalla, como se muestra en la Figura 5a. Una vez dentro, la mirilla cambiaba su color a amarillo. Al cabo de un segundo, se emitía un sonido de “éxito” a través de los

altavoces el *target* desaparecía y la mirilla volvía a su color inicial. Se iniciaba entonces un nuevo *trial*, es decir, aparecía un nuevo *target* en un orificio diferente.

Todo esto se repetía un total de 20 veces, de tal forma que el *target* apareciera una vez en cada uno de los agujeros disponibles. Durante todo este proceso en la esquina superior derecha de la pantalla se mostraba un contador regresivo, que mostraba el número de objetivos que quedaban por encontrar.

2.4.4.2 Material

El experimento se llevó a cabo en una sala cerrada, la mitad de los participantes utilizó un ordenador portátil y la otra mitad una tableta. El portátil era un Asus K541UJ-GO319T con Windows 10, mientras que la tableta era Samsung Galaxy TabS4, con la versión 9 del sistema operativo Android. La aplicación que se utilizó en el experimento fue desarrollada expresamente para el mismo con Unity3D y utilizando el visor HOM3R (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodríguez, et al., 2017). Funcionó a pantalla completa, en una pantalla de 15,6 pulgadas con una resolución de 1366x768 píxeles en el portátil y en una pantalla táctil de 10,50 pulgadas dentro de una resolución de 2560x1600 píxeles en la tableta.

En el ordenador la aplicación se manejaba con un ratón y en la tableta con los dedos. En el primer caso el control de rotación de los ejes X e Y se lograba manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón a la vez que se movía el ratón. En la pantalla táctil, los gestos con un dedo sobre la pantalla controlan la rotación de los ejes X e Y. La relación controlador-pantalla (*control-to-display ratio*) se eligió, en función de la resolución del dispositivo, para girar el modelo 3D 180° cuando el ratón o los dedos se movían de un lado a otro de la pantalla. Esto hacía a la aplicación independiente de la resolución del dispositivo.

El caso del ordenador se situaba en una mesa junto con el ratón. Sin embargo, los participantes que utilizaban la tableta podían decidir si la colocaban sobre la mesa o la sostenían en el regazo. Una vez decidido esto debían mantener la tableta en la misma posición durante todo el estudio. En cualquier caso, esta decisión era registrada por el experimentador para cada participante.

Como ya se ha explicado, para interactuar con la esfera la aplicación implementaba la técnica TAV con eje fijo para ambas interfaces, tanto ratón como táctil. La técnica permitía seleccionar que eje fijar, *up* o *right*, independiente de la geometría del objeto. Los detalles del funcionamiento de cada una de las variantes pueden verse en la Figura 3.

El modelo 3D empleado, la esfera, estaba cubierta por una textura que representaba meridianos y paralelos. De esta forma estábamos sugiriendo un eje de rotación intrínseco del objeto mediante la textura. En lugar de elegir objetos que tuviesen formas diferentes, se eligió deliberadamente una esfera para evitar sugerir ningún eje de rotación intrínseco a través de la geometría del objeto, lo que podía interferir con la tarea de inspección.

El orden en que los *targets* se iban mostrando en cada uno de los orificios, garantizaba que el siguiente *target* a encontrar apareciera siempre en un lugar no visible de la esfera. De este modo, se aseguraba que el participante tenía siempre que girar la esfera para localizar el objetivo oculto en cada nuevo trial.

Para lograr este objetivo, lo primero que se hizo es distribuir los veinte agujeros que estaban en los vértices de un dodecaedro, ver Figura 5b. Además, se pre calcularon varias secuencias de vértices que situaban cada blanco en uno de los agujeros cercanos del punto antípoda del anterior. De entre todas las secuencias generadas se seleccionaron cuatro de ellas en las que el primer objetivo está inicialmente oculto, ver Tabla 1. Todo este procedimiento pretende ser una extensión en 3D del anillo

de blancos propuesto por (ISO/TC 159/SC, 2000), que garantiza que la distancia entre blancos consecutivos es siempre la misma.

Finalmente, el radio de la mirilla era del 15% del radio de la esfera, mientras que el radio de los objetivos era del 5,6%.

Tabla 1: Las cuatro secuencias de vértices de un dodecaedro que se utilizaron durante el experimento. Los ID de los vértices pueden verse en la Figura 5b. En cada bloque los targets van apareciendo por este orden en los orificios.

Secuencia	Secuencia de vertices
1	16, 5, 9, 13, 2, 18, 6, 12, 8, 14, 10, 20, 4, 17, 1, 19, 3, 15, 11, 7
2	13, 7, 11, 15, 3, 19, 1, 17, 4, 20, 2, 18, 6, 10, 14, 8, 12, 16, 5, 9
3	18, 2, 20, 4, 7, 13, 9, 5, 16, 3, 15, 11, 1, 17, 14, 10, 6, 12, 8, 19
4	20, 2, 18, 6, 12, 16, 5, 9, 13, 7, 4, 17, 1, 11, 15, 3, 19, 8, 14, 10

2.4.4.3 Participantes

Participaron en el experimento 32 personas, 19 hombres y 13 mujeres, con edades comprendidas entre los 18 y 59 años ($M = 28.8$, $SD = 7.9$). 20 participantes tenían entre 18 y 29 años, nueve entre 30 y 39, dos entre 40 y 49 y uno entre 50 y 59. No se requería experiencia en el uso de programas informáticos de modelado 3D o similares. Sin embargo, todos los participantes estaban muy familiarizados con el uso del ratón y las interfaces táctiles. El 60% de ellos afirmaron tener algo o mucha experiencia en el uso de software de modelado 3D. Por otro lado, el 53% afirmaron jugar con regularidad a videojuegos, el 25% haber jugado en el pasado, pero no recientemente, y el resto afirmó no tener experiencia significativa jugando a videojuegos. Todos los procedimientos fueron revisados y aprobados por el Comité Ético de Experimentación de la Universidad de Málaga, ver apéndice A1.

2.4.4.4 Diseño Experimental

El experimento se diseñó con cuatro condiciones intra-sujeto, que tenían en cuenta las orientaciones vertical y horizontal tanto del eje de rotación fijo de la técnica (eje de referencia de la técnica) como del eje de rotación intrínseco del objeto (eje intrínseco del objeto). Esto dio lugar a dos variables independientes intra-sujeto: la *consistencia* entre el eje intrínseco del objeto y el eje de referencia de la técnica y la *orientación* del eje de referencia de técnica.

Estas condiciones se muestran en la Figura 7. Las condiciones A y D se consideran **consistentes** porque el eje de referencia de la técnica y el eje intrínseco del objeto coinciden. Por el contrario, nos referimos a las condiciones B y C como **inconsistentes**, ya que el eje de referencia de la técnica y el eje intrínseco del objeto no coinciden.

Todos los participantes realizaron las cuatro condiciones intra-sujeto, pero la mitad de ellos utilizó la tableta mientras que la otra mitad utilizó un ordenador portátil. Por lo tanto, la plataforma utilizada era una variable independiente inter-sujeto. En la Figura 6 se puede ver un resumen de las variables independientes de este diseño experimental.

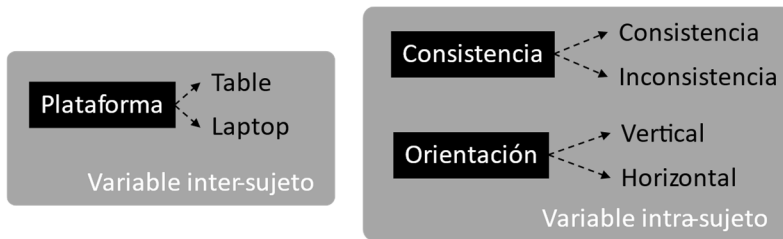


Figura 6. Mapa de variables independientes. La mitad de los participantes utilizó una tableta para realizar el experimento y la otra mitad un ordenador portátil. La orientación se refiere al eje de referencia de la técnica, mientras que la coherencia se refiere a la coherencia entre este eje de referencia de la técnica y el eje intrínseco del objeto.

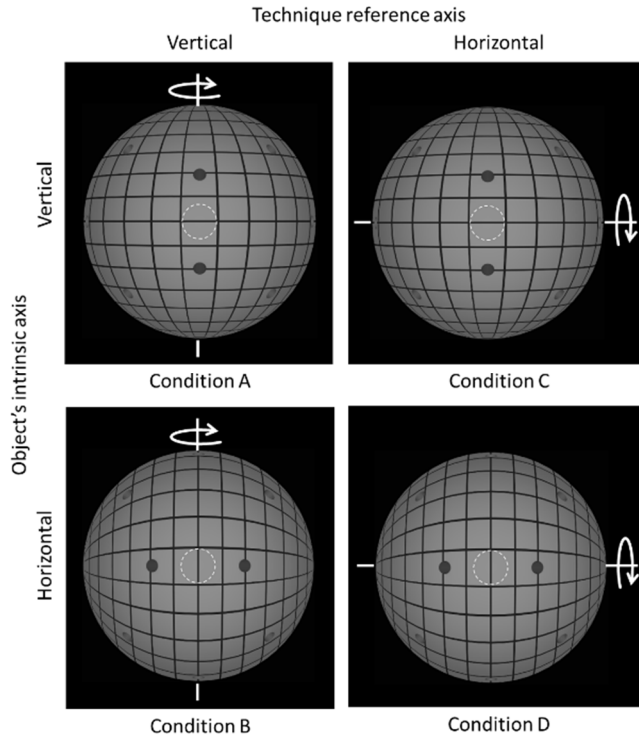


Figura 7. Representación de la esfera para las cuatro condiciones experimentales. Las filas indican el eje intrínseco del objeto. Las columnas muestran el eje de referencia de la técnica, que también se indica con un eje blanco que atraviesa la esfera. A y D son consistentes, y B y C son inconsistentes.

2.4.4.5 Procedimiento

Los participantes eran incluidos en una de las dos condiciones inter-sujeto, ratón o tableta, según su orden de participación. Antes de comenzar el experimento todos recibieron información sobre el procedimiento del estudio y firmaron un formulario de consentimiento informado. A continuación, se les pidió que rellenaran un cuestionario demográfico en el que indicaban su sexo, edad y experiencia con la manipulación de objetos 3D. Además, rellenaron un segundo cuestionario con el objeto de determinar su nivel de fatiga antes del comienzo del experimento.

En cuanto la información que se les facilitaba sobre el estudio; se les daba una serie de instrucciones sobre el procedimiento y la forma de interactuar con el dispositivo. No se les daba ninguna explicación ni demostración de la técnica de rotación. Solo se les decía que iban a probar cuatro variantes de la misma técnica para manipular objetos 3D. Por otro lado, sí que se les decía en cada *trial* el siguiente objetivo a buscar siempre saldría aproximadamente en las antípodas del objetivo previo.

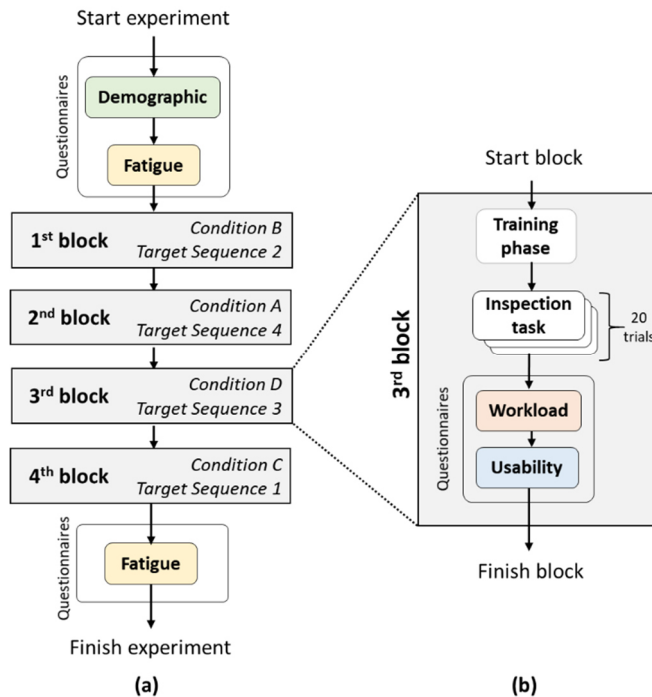


Figura 8. Procedimiento experimental. (a) muestra el procedimiento completo del experimento. (b) muestra el procedimiento de un bloque. Las condiciones y el orden de la secuencia para el participante n^o3 se muestran como ejemplo.

Tras completar los cuestionarios comenzaba el experimento propiamente dicho. Los participantes tenían que completar cuatro bloques, uno por cada una de las condiciones. Los escenarios y el orden de los objetivos eran aleatorios y se contrabalancean mediante cuadrados latinos. Una vez completados los cuatro bloques, se les pedía que

rellenasen un segundo cuestionario de fatiga y el experimento concluía. En la Figura 8a se esquematiza todo este proceso que se acaba de describir.

El procedimiento dentro cada bloque, detallado en la Figura 8b, comenzaba con una fase de entrenamiento. Durante la misma aparecía en la pantalla la palabra “*Training*” y no mostraba el contador regresivo. Los participantes podían permanecer en esta fase todo el tiempo que estimarían oportuno. Una vez que se sintieran preparados debían pulsar el botón de inicio, situado en la esquina inferior derecha de la pantalla. En ese momento se cargaba el escenario mostrado en Figura 5a y daban comienzo los veinte *trials* descritos, ver la sección 2.4.4.1. La ubicación en que iban saliendo los *targets* ocultos en cada *trial* seguía la estrategia descrita en la sección 2.4.4.2. Se les pidió a los participantes que completaran cada *trial* lo más rápidamente posible. Finalmente, tras finalizar los veinte *trials* los participantes debían rellenar (mediante la misma aplicación) un cuestionario de usabilidad y otro de carga de trabajo relativos a la técnica de rotación que acababan de utilizar.

2.4.5 Recogida y análisis de datos

Para medir el rendimiento se registraba en cada *trial* el tiempo que tardaban los participantes en colocar el *target* dentro de la mirilla circular. Por cada participante y cada condición se recogían 20 medidas, lo que hace un de 80 de rendimiento por participante. Como el experimento lo realizaron 32 participantes, en total se acumularon 2.560 muestras de tiempo para analizar. Por cada participante y cada condición experimental se calcularon tres promedios de tiempo: uno para los 10 primeros *trials*, otro para los 10 últimos y el promedio general de los 20. Estos promedios se obtuvieron calculando las medias geométricas de los tiempos de los *trials* aplicando una transformación logarítmica a las mediciones de tiempo, calculando la media aritmética de dicho logaritmo y exponenciando de nuevo para obtener la media geométrica. Esto se hizo para corregir la asimetría positiva debida a que algunos

usuarios tardan un tiempo muy largo en completar algunas pruebas (Sauro & Lewis, 2010).

La usabilidad percibida se midió con el cuestionario SUS de diez ítems (Brooke, 1996a), concretamente se usó la traducción al español de (Devin, s. f.)(Devin, s. f.). Los participantes rellenaban un cuestionario por cada condición experimental y cada una de las preguntas se puntuaban en una escala Likert de 5 puntos, de 1 *totalmente en desacuerdo* a 5 *totalmente de acuerdo*. Las respuestas a los diez ítems de cada cuestionario se evaluaron (Sauro, 2011) para obtener una puntuación que resume la percepción del sujeto sobre la usabilidad en cada una de las condiciones. Además, este factor se dividió en dos factores o subescalas, *learnability* y *usability*, tal y como describen Lewis & Sauro (2009) y Borsci et al. (2009).

Para medir la carga de trabajo se utilizó el cuestionario *Raw TLX (RTLX)*, una modificación del *NASA Task Load Index (NASA-TLX)*. El RTLX se basa en el TLX original de la NASA, del que se elimina el proceso de ponderación. Se ha demostrado que el RTLX es tan sensible como el TLX, pero mucho más simple (Hart, 2006). Se utilizó la traducción al español propuesta por de Arquer & Nogareda (2001). El cuestionario consiste en seis preguntas que se evalúan utilizando una escala de 21 puntos, de *muy bajo* a *muy alto*. Con estos datos se calculó una puntuación RTLX por participante y condición, ya que cada participante rellenó un cuestionario por cada una de las condiciones experimentales. Además de esta puntuación RTLX global, se obtuvieron también una puntuación por cada una de las seis subescalas que componen el RTLX para cada condición y cada participante. Las subescalas son: Exigencia mental, física y temporal, Frustración, Esfuerzo y Rendimiento.

Con el objetivo de saber si las dos plataformas empleadas eran comparables era necesario conocer si provocaban una fatiga similar. Para ello, los participantes rellenaron dos cuestionarios de fatiga, uno justo

antes y otro justo después de realizar el experimento. Estos cuestionarios estaban basados en los propuestos por Shaw (1998). Cada participante evaluaba su fatiga en seis zonas corporales (ojos, cuello, manos, muñecas, brazos y hombros) mediante una escala Likert de 10 puntos (de ninguna fatiga a fatiga extrema). Los datos de ambos cuestionarios se analizaron conjuntamente y se obtuvo una media de la fatiga provocada por el experimento y una media por cada parte del cuerpo evaluada.

Para analizar e informar detalladamente de los resultados se emplearon técnicas de estimación basadas en el tamaño del efecto y los intervalos de confianza (CI) para analizar los datos, tal y como recomiendan Cumming (2014) y VandenBos (2009a). Además, se realizó un análisis ANOVA de diseño mixto, con un factor inter-sujetos (la plataforma) y dos factores intra-sujetos (consistencia y eje de referencia de la técnica). Estos análisis se han realizado para el tiempo de realización de la tarea, la usabilidad y la carga de trabajo. Para analizar la fatiga causada por la plataforma se realizó una prueba T de muestras independientes.

2.4.6 Resultados

2.4.6.1 Rendimiento

Para estimar el rendimiento, la aplicación midió el tiempo que los participantes tardaron en completar cada una de las tareas, es decir, el tiempo empleado en encontrar y alinear el objetivo dentro del visor circular, como se detalla en las secciones previas.

Se comenzó el análisis de los resultados estudiando la plataforma, donde no se pudo encontrar ningún efecto. Los participantes que

utilizaron el ratón tardaron una media de $7.20s^{+0.97}_{-0.86}$ ¹ segundos, mientras que los que utilizaron la interfaz táctil necesitaron $7.95s^{+1.2}_{-1.07}$. Con una diferencia estimada de $0.75s^{+1.2}_{-0.43}$. Este intervalo de confianza de la diferencia es muy grande, incluyendo la no diferencia como caso plausible. El análisis ANOVA corrobora estos resultados, obteniéndose ($F(1,30)=2,33$, $p=0,137$) para el efecto principal de la plataforma.

Estos resultados, junto a los del estudio de la fatiga percibida, que se muestran más adelante en la sección 2.4.6.4, confirman que la plataforma no parece tener un efecto significativo. Por este motivo, a partir de aquí, el resto de los análisis se realizaron juntando los resultados, independiente de la plataforma.

Con respecto a la consistencia, se obtuvo un tiempo medio de $7.24s^{+0.51}_{-0.48}$ para las configuraciones consistentes y de $7.9s^{+0.7}_{-0.64}$ para las configuraciones inconsistentes. Con una diferencia estimada de $0.67s^{+0.45}_{-0.41}$, que presenta unos intervalos de confianza de tamaño moderado que no incluyen al cero. Los resultados del análisis ANOVA fueron ($F(1, 30)= 13,077$, $p= 0,001$). Todo esto sugiere que las configuraciones consistentes tienen un efecto beneficioso significativo en el tiempo de realización de la tarea.

En cuanto a la influencia del eje fijado por la técnica de interacción, se encontró que, si bien el eje puede tener algún efecto sobre el tiempo de finalización de la tarea, es probable que este sea marginal. El análisis ANOVA resultó en ($F(1,30) = 3,681$, $p=0,065$). Para el eje vertical, los participantes tardaron una media de $7.4s^{+0.6}_{-0.57}$, mientras que para el eje

¹ Todos los intervalos de confianza (IC) son al 95%. En el caso de las medidas de rendimiento los intervalos no son simétricos debido a que las medias se han calculado en el dominio logarítmico, tal y como proponen en su trabajo Sauro & Lewis (2010)Sauro & Lewis (2010).

horizontal fijo tardaron de media $7.73s^{+0.62}_{-0.57}$. Con una diferencia estimada de $0.34s^{+0.4}_{-0.37}$.

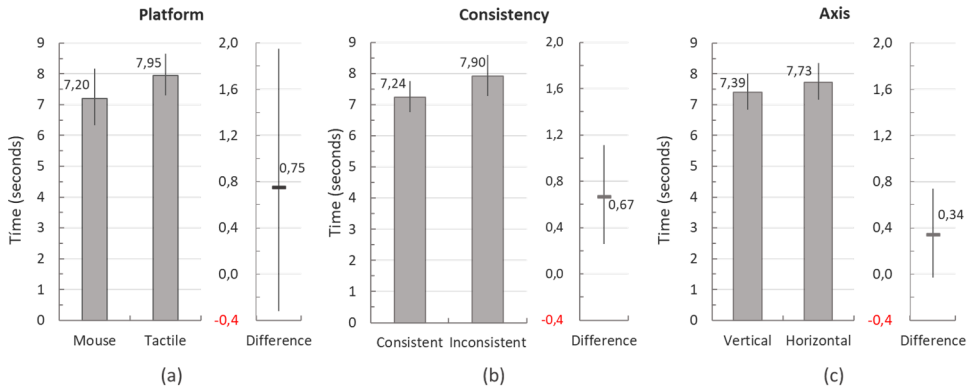


Figura 9. Medias estimadas junto con sus IC para las tres variables: (a) plataforma, (b) consistencia y (c) eje de orientación de la técnica. En (a) $n = 16$, mientras que en (b) y (c) $n = 32$. Todas las barras de error son IC del 95%.

Se ha analizado también el tiempo medio de finalización de la tarea para cada condición experimental, los resultados se muestran en la Figura 10a. Estos sugieren que las condiciones consistentes, A y D, implican tiempos de finalización más bajos. Además, cuando las condiciones son consistentes, la condición del eje vertical parece tener un mejor rendimiento que la horizontal. Sin embargo, cuando las condiciones son inconsistentes, los tiempos parecen ser similares para ambos ejes de orientación.

Interacciones entre los factores

También fueron analizadas las interacciones entre los factores, empleando para ello el análisis ANOVA. Primero se estudió la interacción entre la plataforma y los factores intra-sujeto. Se obtuvo como resultado ($F(1, 30) = 2,076$, $p = 0,16$) para la interacción entre la plataforma y la consistencia, y ($F(1, 30) = 0,359$, $p = 0,554$) para la interacción entre el eje y la plataforma. A continuación se estudió la interacción entre la consistencia y el eje, obteniéndose ($F(1, 30) = 1,17$

$p= 0,28$). Así pues, consideramos que estos efectos de interacción pueden despreciarse y basaremos nuestro análisis en los efectos principales.

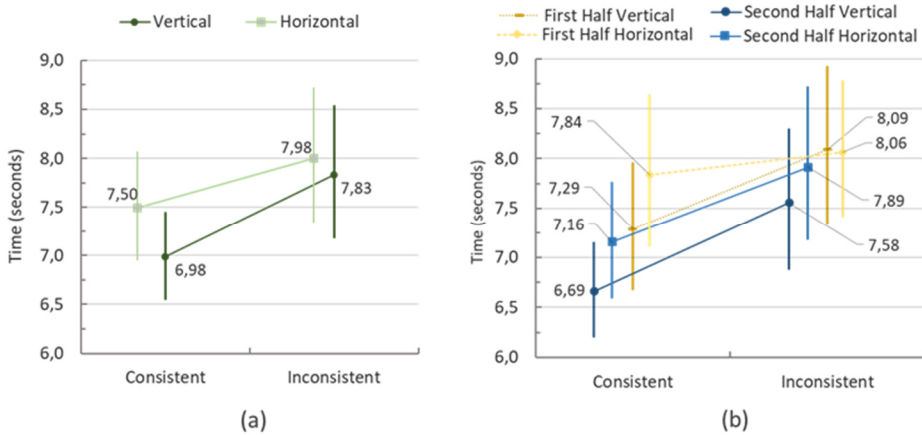


Figura 10. Medias estimadas e IC para el tiempo de finalización de la tarea separados para cada condición experimental. Vertical consistente(A), horizontal consistente(D), vertical inconsistente(B) y horizontal inconsistente(C). Las condiciones del mismo eje de orientación se han unido con líneas. A la izquierda, en (a), se muestran los resultados de los veinte ensayos. A la derecha, en (b), mostramos los resultados por separado para los diez primeros y los diez últimos ensayos para ilustrar posibles efectos de aprendizaje (véase el texto). Todos los resultados utilizan $n= 32$. Todas las barras de error son IC del 95%.

Análisis de los efectos del aprendizaje en el rendimiento

Para estudiar los posibles efectos del aprendizaje en el rendimiento se han seguido dos estrategias. Por un lado, se calculó un modelo de regresión lineal. Este modelo intenta predecir el tiempo de ejecución como una función lineal del número de ensayos. Todos los tiempos de realización de los *trials* se utilizaron como muestras para este análisis y se representan en la Figura 11. El gráfico muestra un tiempo descendente a lo largo de los ensayos. El efecto del número de ensayos sobre el tiempo de finalización resultó significativo con $(F(1, 2558)= 31,0276, p< 0,001)$. Sin embargo, es probable que el efecto del aprendizaje sea pequeño, ya

que sólo el 1,2% de la varianza del tiempo se explicó por el número de ensayos (R^2 de 0,012).

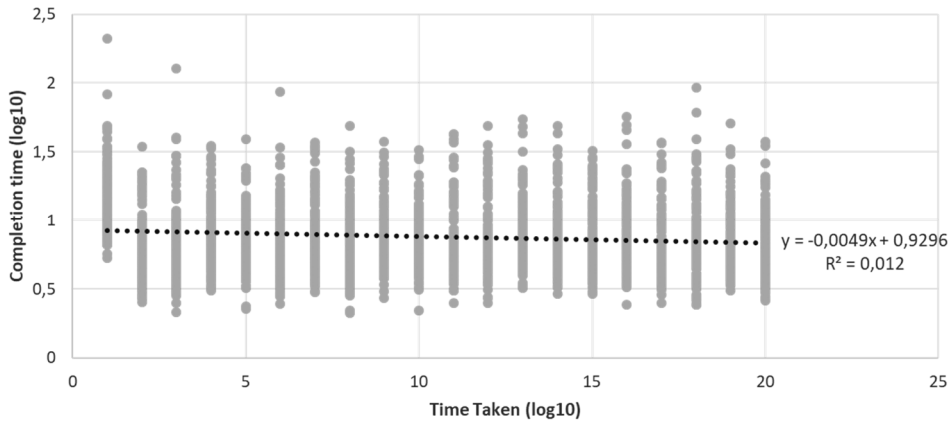


Figura 11. Modelo de regresión lineal calculado para analizar los efectos del aprendizaje.

La otra estrategia empleada consistió en dividir los veinte *trials* en dos mitades, los diez primeros y los diez últimos, y estudiar cada uno de ellos de forma separada para cada condición experimental (Figura 10b) y para cada factor/grupo (Figura 12). Los resultados del primero de ellos, el análisis de los tiempos medios de finalización para cada condición experimental (Figura 10b), muestra en las condiciones consistentes una mejora media del rendimiento del 8,45%, entre bloques, mientras que las condiciones inconsistentes sólo muestran una mejora del 4,2%.

En los resultados del análisis de los tiempos promedios para cada factor/grupo de la Figura 12 se pueden observar que para los primero diez *trials*, las condiciones consistentes tienen un tiempo promedio que es solo levemente inferior al de las condiciones inconsistentes: $7.56s \pm_{-0.51}^{+0.54}$ frente a $8.08s \pm_{-0.64}^{+0.7}$, con una diferencia estimada de $0.52s \pm_{-0.52}^{+0.56}$. Por el contrario, en los últimos diez *trials* el efecto de la consistencia parece ser más fuerte: $(6.92 \pm_{-0.49}^{+0.5})$ para las configuraciones consistentes frente a $7.73s \pm_{-0.51}^{+0.55}$ para las inconsistentes, con una diferencia estimada de $0.81s \pm_{-0.42}^{+0.45}$. Esto es una diferencia estimada un 55,8% mayor en los

últimos ensayos y con un IC que también es menor. Con todo esto parece razonable afirmar que las condiciones consistentes parecen ayudar a los participantes a aprender más rápido.

En cuanto al eje de orientación de la técnica: en los diez primeros *trials*, el tiempo medio empleado fue muy similar: $7.68s \pm_{-0.68}^{+0.76}$ cuando el eje era vertical y $7.95s \pm_{-0.68}^{+0.74}$ cuando era horizontal, con una diferencia estimada de $0.27s \pm_{-0.54}^{+0.59}$, lo que no sugiere ventaja alguna para ninguno de los ejes. Para la segunda mitad de los ensayos, tiempo promedio empleado para el eje vertical fue $7.15s \pm_{-0.58}^{+0.63}$ y para el eje horizontal se obtuvo $7.52s \pm_{-0.58}^{+0.63}$. La diferencia estimada en este caso fue de $0.4s \pm_{-0.45}^{+0.49}$, lo que sugiere un pequeño efecto favorable al eje vertical para este grupo de *trials*. Parece razonable afirmar entonces que existe una probable pequeña diferencia en el aprendizaje en función del eje de orientación.

En los resultados de la Figura 10b parece observarse también cierta interacción entre la consistencia y el eje de orientación, sólo cuando se consideran los diez primeros ensayos; sin embargo, el análisis ANOVA no mostró diferencias significativas ($F(1, 30) = 1,748, p = 0,196$).

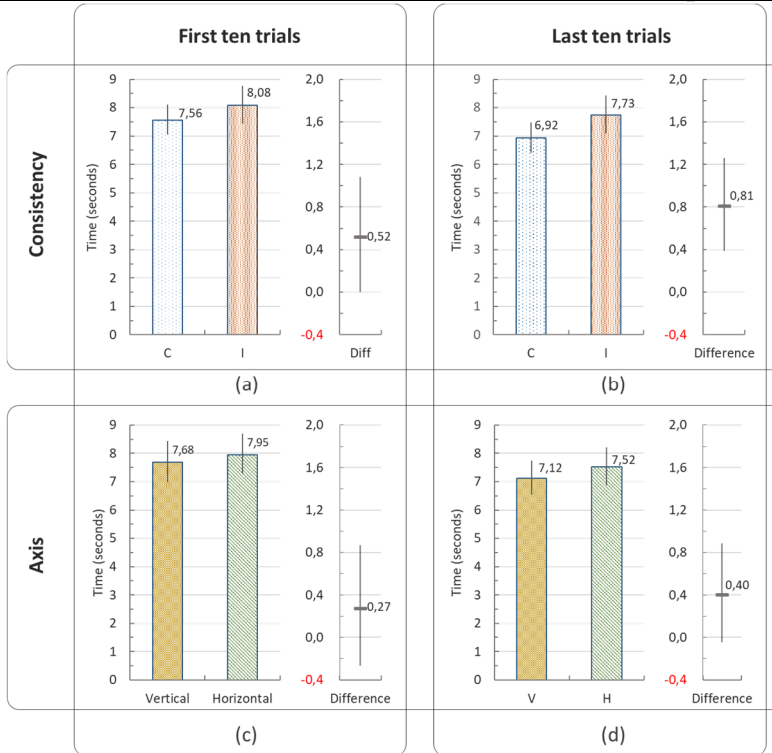


Figura 12. Medias estimadas e IC para el tiempo de finalización de la tarea para las dos mitades de *trials* para los factores intra-sujetos con $n = 32$. (a) y (b) muestran los resultados para la consistencia y (c) and (d) los resultados para el eje de la técnica. (a) y (c) muestran los primeros diez ensayos, (b) y (d) los diez últimos. En cada caso se muestra, a la derecha, la diferencia estimada junto a su IC. Todas las barras de error son intervalos de confianza al 95%.

2.4.6.2 Usabilidad Percibida

Para estudiar la usabilidad percibida se estudiaron los resultados de los cuestionarios SUS. Este análisis se comenzó estudiando si existía algún efecto de la plataforma, táctil vs. ratón, en la puntuación SUS. Para el uso del ratón la puntuación media SUS fue de $63 \pm_{6,1}^{6,11}$, mientras que para la plataforma táctil se obtuvo $62 \pm_{6,1}^{6,1}$. Con una diferencia

¹ Tenga en cuenta que en este caso más es mejor.

estimada de 1.72 ± 8.66 , que está prácticamente centrada en cero, ver Figura 13(a). Además, el análisis ANOVA dio como resultado ($F(1, 30) = 0.164, p = 0.688$). Todo nos hace afirmar que no se ha encontrado ningún efecto de la plataforma en la usabilidad percibida medida por la puntuación SUS.

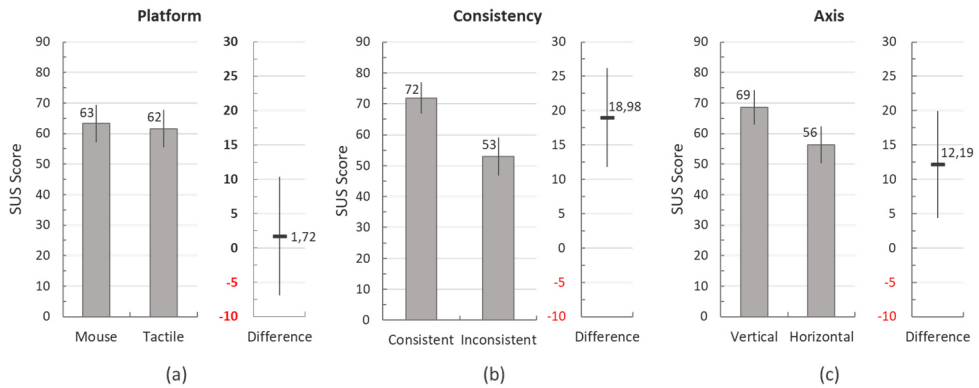


Figura 13. Medias e IC estimados para las puntuaciones SUS de los tres factores. La diferencia estimada entre ellos se representa a la derecha de cada factor, con su IC. Obsérvese que más es mejor. (a) Plataforma, factor inter-sujeto, con $n = 16$ para cada grupo. (b) Consistencia, factor intra-sujeto, con $n = 32$. (c) Orientación del eje de la técnica, factor intra-sujeto, con $n = 32$. Todas las barras de error son intervalos de confianza al 95%.

Con respecto a la consistencia, ver Figura 13b, de media las condiciones consistentes puntuaron 72 ± 5.0 mientras que las inconsistentes obtuvieron 53 ± 6.1 . La diferencia estimada en este caso es de 18.98 ± 7.18 , que está lejos de cero pese a que los intervalos de confianza no son pequeños. Por su parte, el resultado del análisis ANOVA para este efecto principal de la consistencia fue de ($F(1, 30) = 29.183, p < 0.001$). Este análisis parece, por tanto, aportar evidencias de que las puntuaciones, promedios, dadas por los participantes a las situaciones consistentes superan a las inconsistentes.

En cuanto al efecto de la orientación del eje de la técnica: los participantes puntuaron el eje vertical con una media de 69 ± 5.66 y el

horizontal con $56^{+5.98}_{-5.98}$. Dando lugar a una diferencia estimada de $12.19^{+7.78}_{-7.78}$. El efecto principal obtenido a partir del ANOVA fue ($F(1, 30) = 10,232, p = 0,003$). Este análisis parece, pues, proporcionar pruebas fehacientes de que el eje vertical obtiene mejores puntuaciones en la usabilidad percibida que el eje horizontal.

Interacción entre los factores

Al estudiar las cuatro condiciones por separado, se puede ver que la condición A (consistente vertical) dio puntuaciones más altas que todas las demás, mientras que la condición C (inconsistente horizontal) produjo las puntuaciones más bajas (véase la Figura 14). No se encontró ningún efecto de interacción significativo entre la consistencia y el eje de la técnica: el resultado de la ANOVA fue ($F(1,30) = 2.494, p = 0.125$). Tampoco se pudo medir ninguna interacción entre la plataforma y los factores intra-sujetos: ($F(1, 30) = 0.084, p = 0.775$) para la interacción entre la consistencia y la plataforma, y ($F(1, 30) = 0.203, p = 0.655$) para la interacción entre el eje y la plataforma.

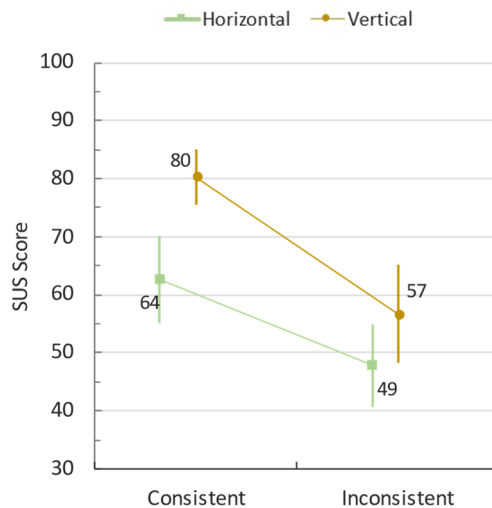


Figura 14. Medias e IC estimados para las puntuaciones SUS según cada condición experimental; las condiciones con el mismo eje se han unido mediante líneas. Todas las barras de error son IC del 95%.

Análisis de las subescalas SUS

Se llevo a cabo también un estudio de las respectivas subescalas del factor de usabilidad SUS, facilidad de aprendizaje y de uso. En la Figura 15 se pueden ver los resultados de dicho estudio. En los mismo se puede apreciar como la condición consistente se percibe como ventajosa tanto en términos de facilidad de aprendizaje como de facilidad de uso. Para el caso de la orientación eje de la técnica: no es posible afirmar que se haya medido un efecto sobre la capacidad de aprendizaje, la diferencia estimada obtenida es prácticamente cero. En cuando a la facilidad de uso, los resultados no son concluyentes, aunque parece que el eje vertical puede tener una mejor respuesta.

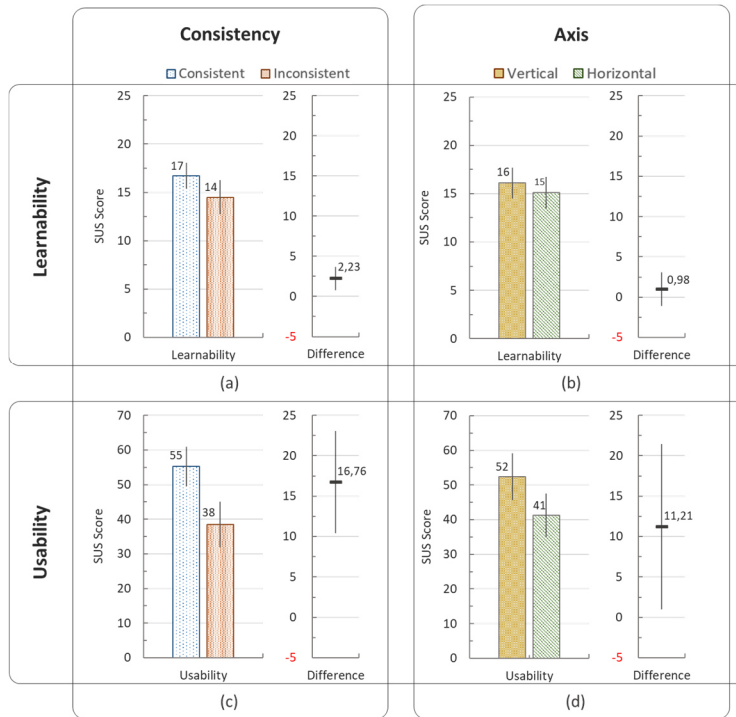


Figura 15. Medias estimadas e IC de las subescalas SUS, facilidad de aprendizaje y facilidad de uso. (a) y (c) corresponden al factor consistencia. (b) y (d) corresponden al factor del eje de orientación. En todos los casos, n = 32. En cada caso, la diferencia estimada entre los niveles del factor se representa a la derecha con su IC. Todas las barras de error son IC del 95%.

2.4.6.3 Carga de trabajo percibida

La carga de trabajo percibida se midió mediante cuestionarios RTLX y su posterior análisis¹, ver Figura 16. De nuevo se empieza estudiando el efecto de la plataforma en los resultados. Para el caso del ratón se obtuvo una puntuación promedio de los cuestionarios de 39^{+8}_{-8} , mientras que para la interfaz táctil se obtuvo 44^{+8}_{-8} . La diferencia estimada fue de $5^{+11,33}_{-11,33}$, lo que supone un intervalo de confianza muy amplio y que incluye el cero. El estudio ANOVA dio como resultado ($F(1, 30) = 0,813$, $p = 0,374$). Todo esto confirma que, nuevamente, no se observa ningún efecto principal de la plataforma en los resultados de la carga de trabajo percibida. En contraposición, al estudiar la consistencia y la orientación del eje de la técnica sí que se encontraron efectos significativos, como se verá a continuación.

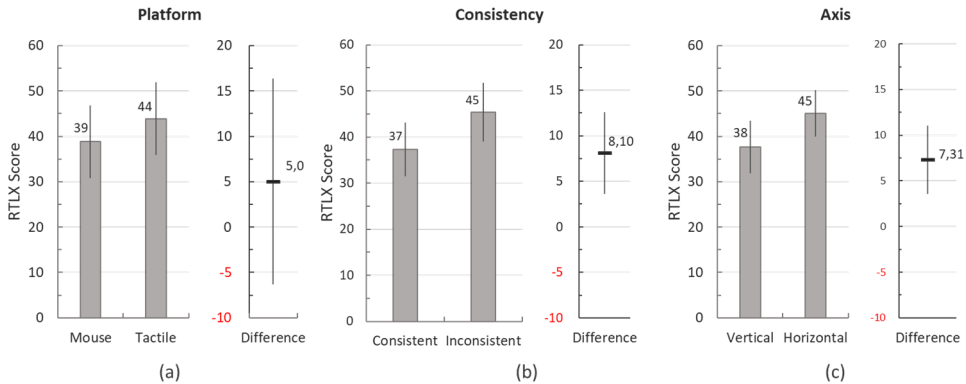


Figura 16. Medias estimadas e IC de la puntuación RTLX para los tres factores estudiados. En cada caso, la diferencia estimada entre ellos se representa a la derecha con su IC. Obsérvese que menos es mejor. (a) Plataforma, factor inter-sujeto, con $n = 16$ para cada grupo. (b) Consistencia y (c) eje de la técnica. Ambos factores intra-sujeto con $n = 32$. Todas las barras de error son intervalos de confianza al 95%.

¹ Note que en este caso menos es mejor.

Para las condiciones consistentes se obtuvo un promedio de $37^{+6.23}_{-6.23}$ y para las inconsistentes de $45^{+6.4}_{-6.4}$. Con una diferencia estimada de $8.1^{+4.5}_{-4.5}$. El análisis ANOVA también apoyó un posible efecto de la consistencia, ya que se obtuvo ($F(1, 30) = 13,61, p = 0,001$). Para el caso del eje, los participantes puntuaron en promedio los bloques con el eje vertical con un $38^{+5.8}_{-5.8}$, y el horizontal con $45^{+5.1}_{-5.1}$. Se calculó una diferencia estimada entre ambas de $7.31^{+3.8}_{-3.8}$. El resultado del análisis ANOVA fue ($F(1, 30) = 15.63, p < 0.001$). Por tanto, los resultados parecen indicar que tanto las situaciones consistentes como las que tenían eje vertical tienen un efecto positivo sobre la carga de trabajo percibida por los participantes.

Interacción entre factores

Se han analizado aquí las distintas condiciones experimentales por separado, en la Figura 17 se muestran los resultados detallados. Se puede observar que para el caso consistente-vertical (caso A) la puntuación RTLX promedio es la más baja de todas, mientras que las demás condiciones tuvieron puntuaciones que sugieren un efecto similar. Sin embargo, los intervalos de confianza son muy similares para las cuatro condiciones. Sin embargo, al realizar el análisis ANOVA de la interacción entre estos factores se obtuvo ($F(1,30) = 2.343, p = 0.136$). Por lo tanto, se puede decir que para la puntuación RTLX no se pudo identificar un efecto de interacción entre la consistencia y la orientación del eje de la técnica.

Se realizó también, mediante el análisis ANOVA, el estudio de la interacción entre la plataforma y los factores intra-sujetos y tampoco se encontró una interacción significativa. Se obtuvo ($F(1, 30) = 0,366, p = 0,55$) para la interacción entre la consistencia y la plataforma y ($F(1, 30) = 0,122, p = 0,73$) para la interacción entre el eje y la plataforma.

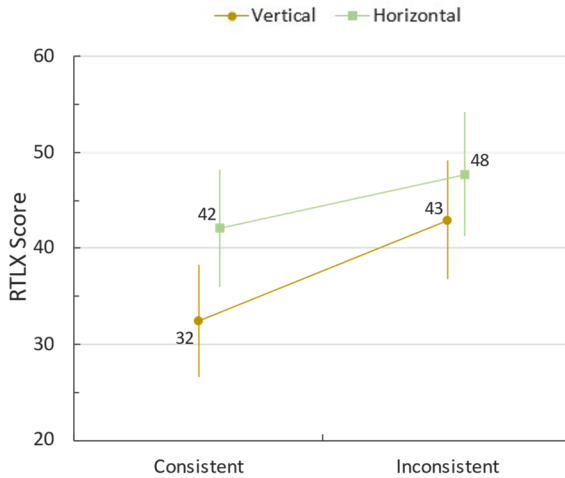


Figura 17. Medias e IC estimados para la puntuación RTLX separados por cada condición experimental. Las condiciones con el mismo eje se han unido mediante líneas. Todas las barras de error son IC del 95%.

Análisis de las subescalas RTLX

También se ha realizado un estudio separado para las distintas subescalas en que puede dividirse la puntuación RTLX. Los resultados de este estudio pueden verse en la Figura 18. Si se comienza analizando la consistencia, se puede observar que todas las subescalas se comportan de forma similar. Todas presentan un efecto positivo de las condiciones consistentes. Y todas tienen promedios e IC similares excepto la frustración, para la cual se midió un efecto ligeramente mayor.

Con respecto a la orientación del eje, igualmente se observa que todas las subescalas puntúan de forma muy similar, tanto en medias como en IC. El uso de un eje vertical parece mejorar la puntuación RTLX en todas las subescalas. En este caso, la frustración sólo destaca porque es la que presenta mayor incertidumbre.

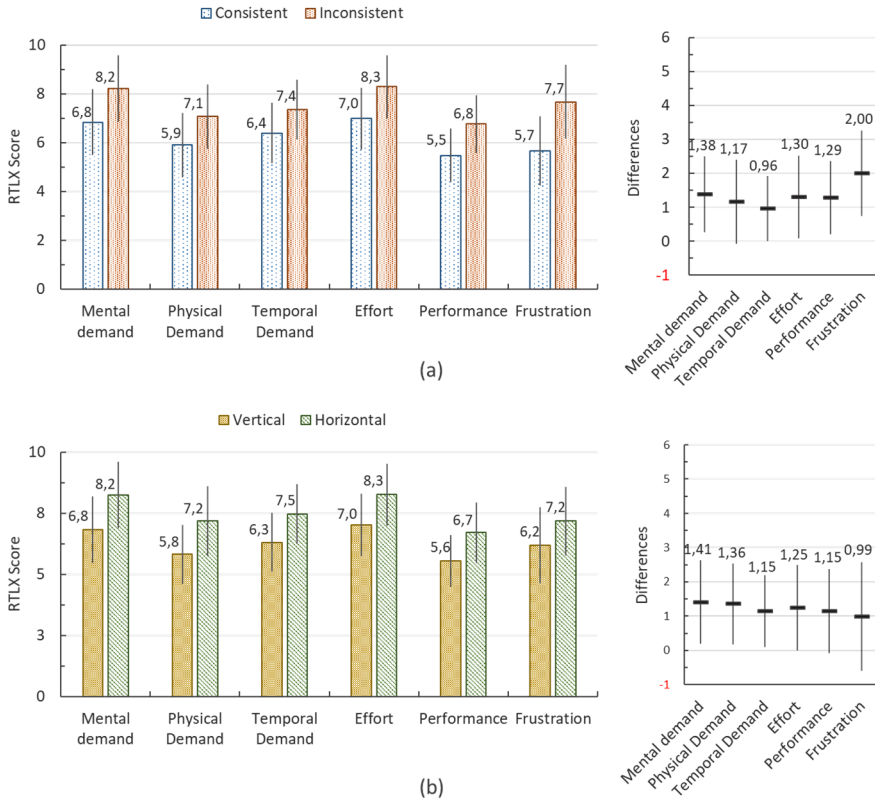


Figura 18. Medias estimadas e IC para las subescalas TLX: demanda mental, física y temporal, esfuerzo, rendimiento y frustración. Obsérvese que menos es mejor. (a) para el factor de coherencia. (b) para el factor del eje de orientación. En ambos casos, $n = 32$. En cada caso, las diferencias estimadas entre los niveles de los factores se representan a la derecha con su IC. Todas las barras de error son IC del 95%.

2.4.6.4 Fatiga

La fatiga percibida se ha medido mediante la comparación de dos cuestionarios, uno relleno antes de comenzar el experimento y otro justo al terminar. El objetivo era comparar ambas plataformas entre sí. Cabe destacar que el incremento de fatiga observado con ambos dispositivos es en general muy bajo, inferior a 1 en una escala de 0 a 10.

El promedio de incremento de fatiga obtenido para el caso del ratón fue de $0.93_{-0.33}^{+0.33}$ y de $0.70_{-0.32}^{+0.32}$ para la plataforma táctil. La diferencia estimada calculada es de $0.23_{-0.29}^{+0.29}$. Además, se utilizó una prueba *t de Student* para comparar los resultados, obteniéndose ($t(30) = 0,963$, $p = 0,343$). Por todo ello, se puede afirmar que no se encontraron evidencias de ninguna diferencia en el incremento global de fatiga entre las dos plataformas.

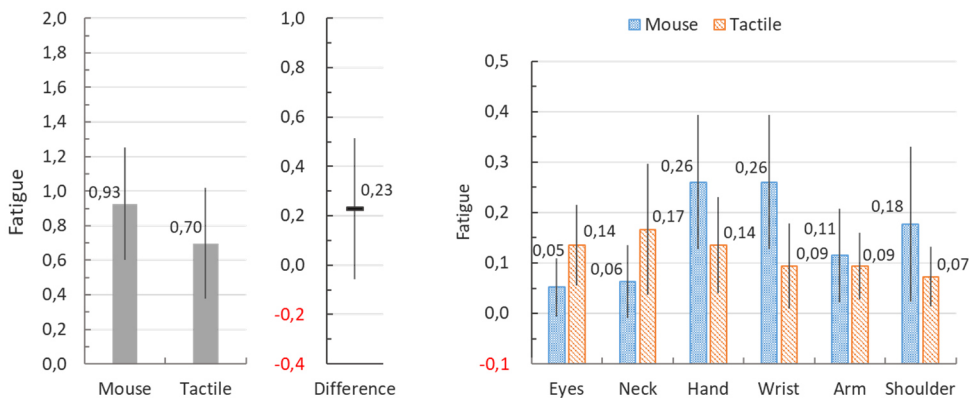


Figura 19. Incremento en el nivel de fatiga expresada por los participantes divididos en dos grupos: los que utilizaron el ratón y los que utilizaron el dispositivo táctil. (a) Resultados globales por plataforma, (b) resultados separados por plataforma y parte del cuerpo. Todas las barras de error son IC del 95% y $n = 16$.

Se ha realizado también un estudio del incremento de fatiga particularizado para cada una de las partes del cuerpo que se evaluaron en los cuestionarios, ver Figura 19. Las manos y las muñecas son las que más contribuyen a la fatiga del ratón. Mientras que para la interfaz táctil el cuello es la zona más relevante. Estos resultados coinciden con el comportamiento de los participantes al utilizar la tableta. Como no les impusimos ninguna restricción, la mayoría decidió dejar la tableta horizontal sobre la mesa sin sujetarla. Parece plausible que esto provoque más fatiga en el cuello debido a su postura inclinada al mirar hacia abajo que la que provocaría en las manos, la muñeca o los hombros.

2.4.7 Discusión

Efecto de la plataforma

Como primer paso de este estudio, se buscó si existían diferencias entre las dos plataformas (ratón y táctil), y no se pudieron encontrar diferencias claras entre ellas. Los resultados no muestran diferencias relevantes en términos de rendimiento, usabilidad o carga de trabajo para la tarea planteada. Y lo que es más importante, el análisis ANOVA no señaló ningún efecto de interacción entre la plataforma y los otros dos factores para ninguno de los tres parámetros evaluados.

Al estudiar la fatiga percibida por los participantes, tampoco se encontraron diferencias entre las plataformas. Aunque sí que se encontraron diferencias en la forma en que las distintas partes del cuerpo contribuyen a la fatiga general percibida, pero no se hallaron diferencias importantes en la fatiga general. En el caso de la interfaz táctil, que se probó mediante un dispositivo tipo tableta, la contribución a la fatiga general de las partes del cuerpo difiere de estudios anteriores (Besançon et al., 2017b). Esto podría justificarse por la forma en que los participantes han utilizado esta plataforma, ya que no se les dio instrucciones específicas sobre cómo sujetar el dispositivo.

Este análisis nos ha permitido suponer que, en el contexto de este experimento ambos paradigmas, el del ratón y el táctil, son equivalentes en términos de interacción 3D. Sin embargo, trabajos anteriores han informado de pequeñas diferencias en el tiempo necesario para realizar tareas más sencillas, como la selección o el acoplamiento 2D (Forlines et al., 2007). Nuestra tarea de inspección podría considerarse un tipo de acoplamiento 3D, ya que implica predecir el movimiento de rotación 3D que tiene lugar en la esfera con respecto al movimiento del dispositivo. Nuestra hipótesis en este punto es que esta tarea implica habilidades cognitivas de alto nivel que parecen ser compartidas por ambos paradigmas y que la tarea motora de bajo nivel, controlar un ratón o

interactuar con la pantalla táctil con un dedo, son en este caso menos importantes. Por este motivo, hemos integrado los resultados de las dos plataformas para poner a prueba nuestras hipótesis.

Efecto de la consistencia

En cuanto a la consistencia de los ejes, que era el principal objetivo del estudio y de la propuesta, se han encontrado pruebas de que la consistencia entre el eje fijo de la técnica de interacción y un eje de rotación intrínseco del objeto influye positivamente en la usabilidad en términos de rendimiento de la tarea, usabilidad percibida y carga mental. En situaciones consistentes, los participantes tardaron de media menos tiempo en realizar las tareas, calificaron el sistema como más usable e indicaron una menor carga de trabajo. Todo ello apoyaría nuestra hipótesis. Como se ha mencionado anteriormente, un estudio previo de Buda (Buda, 2012) comparó el TAV con *Up-vector* fijo y con *Right-vector* fijo, obteniendo que el primero superaba al segundo. Sin embargo, sus experimentos se realizaron utilizando objetos que tenían un eje intrínseco vertical, como un modelo 3D de una cabeza. Esto en realidad concuerda con nuestros resultados, ya que esos objetos son consistentes sólo con el TAV con *Up-vector* fijo.

Considerando nuestro estudio en el marco de la teoría de esquemas propuesta por Schmidt (Schmidt, 1975), la tarea de inspección propuesta requiere una combinación de diferentes tareas discretas, como el deslizamiento de un dedo sobre la pantalla táctil. Cuando el usuario desea girar el objeto en una dirección específica, realiza una acción sobre el sistema lo que produce una respuesta de este. Esta respuesta retroalimenta al usuario y este la compara con el comportamiento esperado del sistema. Esto permite al usuario corregir la acción programada. Si la rotación producida por la acción del usuario es similar a la esperada, se producen menos correcciones y la interacción es más eficaz. Interpretamos nuestros resultados en este marco. Las condiciones consistentes deben de producir una retroalimentación más coincidente

con la esperada y, por tanto, un mayor rendimiento, una mejor usabilidad percibida y una menor carga mental. En otras palabras, cuando el eje fijo es consistente con el eje de rotación intrínseco del objeto, la técnica se ajusta mejor al modelo mental del usuario y la interacción es más fluida. Sin embargo, esto representa sólo una pequeña parte de toda la interacción y, por tanto, las diferencias en los tiempos de realización de la tarea son relativamente pequeñas, aunque suficientes para revelar el efecto. No obstante, estas diferencias son grandes en términos absolutos para la usabilidad y la carga de trabajo percibida por los participantes, lo que apoya nuestra interpretación.

Efecto de la orientación del eje de la técnica

Con respecto al factor de la orientación del eje de la técnica: se ha observado que el eje vertical también tiene un efecto positivo en la usabilidad. Se ha encontrado un efecto en los tres parámetros medidos, aunque de diferentes maneras. Se ha medido un mayor efecto en los parámetros subjetivos, los cuestionarios SUS y RTLX, que, en el tiempo de realización de la tarea, donde no se ha podido medir una diferencia clara. Conjeturamos que los participantes encuentran más cómodo el eje vertical porque les resulta más natural, probablemente porque están más acostumbrados a él. De hecho, ya existen sistemas de navegación con un eje vertical fijo, y se utilizan mucho en aplicaciones de modelado 3D u otras aplicaciones que ofrecen una visión tridimensional de objetos o escenas. El uso de un eje horizontal fijo, que sigue el eje intrínseco del objeto, es una idea novedosa.

Efecto de la relación entre consistencia y el eje de la técnica

Cuando se analizan los dos factores conjuntamente, observamos que la consistencia tiene un mayor efecto sobre los tres parámetros medidos que la orientación del eje. La condición consistente con el eje vertical obtuvo los mejores resultados, seguida de las consistentes con un eje horizontal (Figura 10). Esta ventaja del eje vertical frente al horizontal también se podría explicar a la luz de la teoría de los esquemas, ya que

el programa motor puesto en acción se beneficiaría de la experiencia previa, por lo que estaría más ajustado al comportamiento deseado y requeriría menos correcciones.

Este problema también es similar al clásico efecto de compatibilidad estímulo-respuesta (Proctor & Van Zandt, 2008) y a la teoría más general de la codificación de eventos (Hommel, 2015). Estas teorías proponen explicar el tiempo de respuesta a un estímulo en función de si determinadas características del estímulo son compatibles o no con la respuesta. Asumen que tanto el estímulo como la respuesta comparten una estructura representacional común en el sistema cognitivo, explicando de esta forma como la acción puede influir en la percepción del estímulo.

Aunque nuestra tarea tiene una estructura diferente, se pueden utilizar principios similares para explicar nuestros resultados. En este sentido, algunos autores han estudiado los efectos de compatibilidad espacial, que son diferentes de la relación entre la localización del estímulo y la localización de la respuesta, como cuando se manipulan herramientas. Por ejemplo, Kunde et al. (Kunde et al., 2007) estudiaron el rendimiento de la tarea cuando los movimientos de la mano se transforman en movimientos directos o inversos de una herramienta, mostrando que la respuesta se retrasaba cuando la mano y la herramienta se movían en direcciones no correspondientes en lugar de correspondientes. La teoría nos dice que los usuarios ejecutan un movimiento activando códigos anticipatorios de los efectos sensoriales del movimiento (Müsseler & Skottke, 2011). Nuestros resultados pueden explicarse en el marco de estos modelos. Cuando el objeto tiene un eje de rotación intrínseco, y la técnica de interacción fija ese eje, los códigos de acción activados para navegar alrededor del objeto y la percepción de ese objeto comparten una representación cognitiva común, que es coherente. Por tanto, mejoran el rendimiento y la experiencia del usuario.

Efectos del aprendizaje

Se han analizado también los posibles efectos del aprendizaje en los resultados. Los participantes informaron que les resultaba un poco difícil cada vez que iniciaban una nueva condición, y que poco a poco se iban sintiendo más cómodos con ella. Esto sucedió a pesar de que se les había dicho que podían permanecer en la fase de entrenamiento todo el tiempo que necesitaran hasta dominar la técnica de rotación.

Utilizando un modelo de regresión lineal, hemos comprobado que, efectivamente, existe un pequeño efecto de aprendizaje en cada una de las condiciones (véase la Figura 11). Observando la Figura 10b, se pueden destacar dos aspectos de este efecto de aprendizaje. El primero es que el aprendizaje es más importante en situaciones consistentes. En segundo lugar, parece que existe una pequeña interacción, aunque no es significativa en el ANOVA, entre el eje de la técnica y la consistencia cuando los participantes son inexpertos en la primera mitad de cada bloque. Sin embargo, esto desaparece claramente en la segunda mitad, ya que se adquiere experiencia. Parece que, al principio de un bloque sólo la condición consistente y eje fijo vertical es significativamente mejor, mientras que al final del bloque, el rendimiento mejora en todas las condiciones menos en una: inconsistente con eje fijo horizontal. Podría plantearse la hipótesis de que, al principio, los participantes podrían tener un esquema previo basado en su experiencia con ordenadores y 3D, que se basa en un eje vertical fijo, pero requiere una retroalimentación coherente con el movimiento esperado del objeto. Sin embargo, en cuanto adquieren cierta experiencia, consiguen construir nuevos esquemas mejorando el rendimiento en todas las condiciones excepto en la horizontal-inconsistente, que no tiene ni la ventaja de la consistencia acción-retroalimentación ni ningún esquema ya construido basado en la experiencia.

La evaluación subjetiva a través de los cuestionarios SUS y RTLX parece validar estos resultados ya que los cuestionarios revelan que las

condiciones consistentes fueron percibidas por los participantes como las que tenían más capacidad de aprendizaje, como muestra la Figura 15, y como las que generan menos frustración, como muestra la Figura 18.

2.5 Conclusiones

El objetivo era comprender si la correcta selección de un eje fijo cuando se diseña una técnica de interacción podría mejorar las tareas de inspección al hacer más natural la navegación. Para ello, se realizó un estudio en dos plataformas diferentes, en una se empleaba para la interacción un ratón y la otra una pantalla táctil. En ambos casos, el limitado número de DoF hace que la interacción 3D sea un reto. Se analizó la usabilidad de la técnica, para lo cual se emplearon tres variables diferentes: el rendimiento, en términos del tiempo empleado para completar las tareas, y las escalas de los cuestionarios SUS y RTLX. Se investigó también la fatiga causada por cada una de las plataformas, con el objeto de validar la independencia o no de las técnicas con respecto a ellas.

En resumen, el estudio realizado encontró evidencias que confirman la hipótesis de partida. En una tarea de inspección de un objeto virtual, en la que se interactúa con un número limitado de DoF y en la que se fija un eje en el mapeado de navegación, ocurre que cuando el eje fijado es consistente con un eje intrínseco del objeto que se inspecciona, la interacción es más usable. Se encontró que es más eficiente, más fácil de aprender, produce una menor carga de trabajo mental y genera menos frustración.

Estos resultados reflejan la importancia del eje fijo en una técnica TAV y cómo este eje debe fijarse en función del objeto y del modelo mental que el usuario tiene del mismo. En concreto, cuando el objeto parece estar sobre una superficie, como el suelo, el eje vertical es un eje intrínseco que debe mantenerse fijo ya que la gravedad es siempre vertical. Sin embargo, en los casos en los que el objeto está suspendido

en un espacio vacío y existe un eje intrínseco, como ocurre con el eje de rotación de una rueda o el rotor de una turbina, conviene adaptar la técnica de interacción a ese eje intrínseco fijo.

Los visores 3D utilizados actualmente no tienen en cuenta esta idea, sin embargo, nuestra tesis es que su uso mejoraría la usabilidad. Asimismo, las herramientas actuales de autoría de modelos 3D no permiten la anotación de un modelo con un atributo de eje de rotación intrínseco. Esto podría ser leído automáticamente por los visualizadores 3D, lo que permitiría aplicar nuestros hallazgos para mejorar la usabilidad de la interacción. Otra opción sería aplicar la consistencia mediante mecanismos interactivos como los widgets de visualización. Estos son objetos virtuales (por ejemplo, planos de corte, lentes o emisores de partículas) que ayudan a los usuarios a manipular interactivamente objetos y datos espaciales 3D. Una revisión reciente sobre técnicas de interacción 3D enfocadas en la visualización (Besançon et al., 2021)(Besançon et al., 2021) sugiere que se trata de un área clara de trabajo futuro. Podría ser un mecanismo útil para fijar interactivamente un eje, en la inspección de objetos 3D cuya forma no se conoce de antemano, o para permitir que las aplicaciones adapten la navegación a modelos mentales que pueden variar según los distintos contextos o usuarios.

Una pregunta válida a la hora de desarrollar una nueva herramienta de interacción 3D sería si el esfuerzo de aplicar este mecanismo, para mantener la consistencia entre objeto y eje de la técnica, merece o no la pena. La respuesta a esta pregunta puede depender de un gran número de factores. Quizás no merezca la pena para un visualizador 3D de uso general, por ejemplo, en una tienda web de objetos. Sin embargo, para aplicaciones especializadas que los usuarios utilizan durante largos periodos de tiempo para inspeccionar y/o anotar cuidadosa y sistemáticamente objetos 3D complejos, en ámbitos en los que no cometer errores debidos al cansancio es importante, puede que la implantación de tales mecanismos aumentara el valor del software.

La concepción inicial de este estudio se gestó en el transcurso del proyecto de investigación europeo UiW, específicamente para abordar el escenario de inspección de una turbina de generación eléctrica. La geometría de dicha turbina, caracterizada por una geometría extendida a lo largo de un eje horizontal muy pronunciado, generó resultados insatisfactorios en un primer prototipo que utilizaba una navegación basada en una herramienta de visualización (TAV) con eje fijo tradicional. Esta situación suscitó el interrogante sobre la viabilidad de aprovechar el eje del objeto, lo que motivó el desarrollo de un prototipo alternativo con navegación basada en un cilindro virtual que tenía un eje horizontal.

La evaluación de este último prototipo, realizada por varios expertos de la compañía Tecnatom, produjo resultados alentadores, lo que impulsó el inicio del desarrollo de las técnicas de navegación basadas en elipsoides. Las primeras versiones de estas técnicas se integraron en la herramienta desarrollada en el proyecto UiW (González-toledo et al., 2015). Una versión más avanzada, que ya formaba parte de nuestro visor 3D genérico, se presentó en la *Journal of Virtual Reality and Broadcasting* (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Garre-Del-Olmo, et al., 2018). A partir de ese punto, el desarrollo continuó más allá del marco de UiW, lo que permitió la realización de un estudio preliminar con sujetos y su presentación en el congreso EuroVR 2018 (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Molina-Tanco, et al., 2018). La recepción positiva en dicho congreso motivó la realización de un estudio de evaluación exhaustivo y riguroso, cuyos resultados se exponen en este capítulo y que fueron publicados en (Gonzalez-Toledo et al., 2022b).

Capítulo 3

Navegación elipsoidal

3.1 Introducción

Recordando lo expuesto en el capítulo anterior, en la actualidad es cada vez más habitual el uso de herramientas interacción 3D, ya sea en entornos de trabajo, como de docencia o como en los relacionados con el entretenimiento. Asimismo, cuanto más penetran estas tecnologías en la sociedad más complejas se vuelven las tareas que se quieren realizar con ellas. No obstante, pese a esta complejidad creciente sigue siendo lo más habitual que estas aplicaciones sean manejadas mediante ratón y teclado en ordenadores personales convencionales, aunque en la actualidad es cada vez más frecuente su empleo en dispositivos táctiles, tales como teléfonos móviles o tabletas. Tal y como se destacó en el capítulo previo, se trata en todos los casos de dispositivos de interacción con grados de libertad limitados.

Como se mostró en la sección 2.2, las técnicas de navegación empleadas en la actualidad casi en exclusividad en este tipo de dispositivos son las llamadas de *Virtual Trackball*. Pese a ser, en general, sencillas de implementar obligan en muchos casos a hacer uso de gestos combinados con los dispositivos de interacción para determinadas acciones, por ejemplo, combinando la pulsación de teclas con los gestos del ratón. Esto es así porque en estas técnicas se supone que el objeto tridimensional está encerrado dentro de una esfera virtual sobre la que se sitúa la cámara. Este paradigma funciona muy bien cuando los objetos tienen una alta esfericidad, es decir, un tamaño similar en todas las dimensiones. Sin embargo, cuando los objetos no cumplen este requisito, la cámara orbita en muchas ocasiones muy lejos de la superficie del objeto. Lo cual obliga a que los usuarios tengan que realizar un mayor

uso de operaciones de *zoom* y *paneo*¹ para alcanzar ciertas partes del objeto, como se puede intuir en la Figura 20. A esto se suma que algunas de las técnicas de esta familia no cumplen con el principio de transitividad², lo que va a implicar una curva de aprendizaje más abrupta. Todo esto hace que en determinadas situaciones sean difíciles de usar, lo que complica la ejecución de ciertas tareas e impacta no solo en el tiempo necesario para completar estas tareas sino también en el esfuerzo mental requerido.

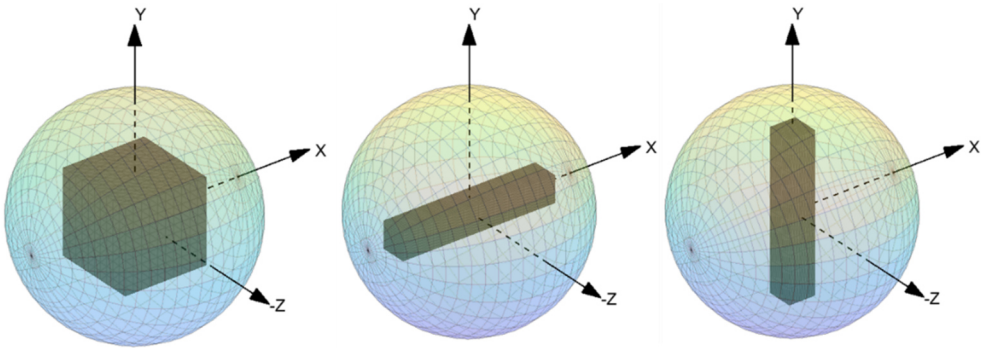


Figura 20. Ejemplo de tres objetos encapsulados en una esfera virtual. Solo el primero de ellos posee una forma con alta esfericidad.

Existen otras alternativas a la familia *Virtual Trackball* para resolver la tarea de inspección de objetos virtuales. Algunos autores han propuesto técnicas que permiten examinar el objeto de cerca siguiendo su superficie, en lugar de orbitar alrededor de él siguiendo trayectorias esféricas. Normalmente se basan en técnicas mucho más complejas, las cuales tratan de ajustar la navegación a la forma real de los objetos. Para ello proponen planear alrededor del objeto siguiendo superficies lisas adaptadas a la geometría de este. *Hovercam* (Khan et al., 2005) es un

¹ Una operación de *paneo* es la traslación en coordenadas globales del centro del trackball.

² El principio de transitividad (Bade et al., 2005b) garantiza que un gesto del dispositivo del punto A al punto B y después al punto C termina en la misma posición que un gesto directo de A hasta C.

buen ejemplo de esta idea, implementa un conjunto de capas de superficies alrededor de un objeto mediante un árbol de esferas y navega por una de ellas según la distancia al objeto. El *Generalized Trackball* (Malomo et al., 2016), un ejemplo más reciente, sigue los principios del *Hovercam* mejorando la definición de la superficie por la que se desplaza el punto de vista alrededor del objeto. Existen otras propuestas, basadas en la navegación volumétrica, que permiten además explorar cavidades (Diepenbrock et al., 2011).

Ninguna de estas estrategias parece haber sido adoptada por las aplicaciones comerciales, para la inspección de objetos tridimensionales. Esto es así, probablemente, porque introducen una gran complejidad y no están exentas de problemas. El más grave es que pueden dar lugar a que el movimiento de la cámara sea inestable, debido a una excesiva dependencia de los detalles de la superficie del objeto.

Otros autores han propuesto enfoques mixtos, como IsoCam (Marton et al., 2014), que implementa tanto la inspección orbital como proximal del objeto siguiendo una superficie que se adapta a las irregularidades de este. Permite además mover la cámara a puntos de vista precalculados para mostrar detalles específicos de interés, una técnica perteneciente a la familia *Point-of-Interest* de técnicas de inspección.

Las técnicas *Point-of-Interest* (PoI) se basan en la idea de que el usuario sólo necesita expresar de algún modo cuál es el punto del objeto 3D que desea explorar con más detalle. En la familia PoI, el usuario selecciona un punto específico en el objeto, y el sistema mueve la cámara a una posición y con una orientación determinada proporciona una vista del punto seleccionado. Scruticam (Decle, 2009) es un ejemplo de esta familia, en la que el usuario coge un punto del objeto y lo mueve hacia el centro de la pantalla. El punto de vista se alinea entonces con el vector normal de la zona correspondiente. Por otro lado, tenemos Navidget (Hachet et al., 2009), que a diferencia de otras técnicas de PoI, no estima dónde y cómo quiere moverse el usuario, sino que proporciona

retroalimentación y control para que el usuario pueda posicionar la cámara.

En conclusión, tanto en las técnicas *Generalized Trackball* como en las PoI, el punto de vista se desplaza a lo largo de trayectorias irregulares alrededor del objeto para permitir la inspección detallada de áreas pequeñas. Mientras que las técnicas clásicas de *TrackBall* mueven el punto de vista alrededor del objeto siguiendo la superficie de una esfera que contiene el objeto y son más apropiadas para realizar un examen global del mismo. Debido a la forma de la superficie sobre la cual se desplaza el punto de vista, las técnicas de *Generalized Trackball* y *PoI* son más coherentes con la metáfora de la navegación alrededor del objeto, mientras que las técnicas de *Virtual Trackball* son más coherentes con la metáfora de la rotación del objeto virtual¹. De hecho, mover el punto de vista sobre la superficie de una esfera produce exactamente el mismo efecto en la escena renderizada que las rotaciones puras del objeto. Por otro lado, las técnicas basadas en la geometría de los objetos, *Generalized trackball*, volumétricas y de PoI, son bastante más difíciles de implementar. Requieren un procesamiento previo para preparar cada nueva escena con la que se quiera trabajar, que en algunos casos puede llegar a ser costoso, ya que es necesario definir múltiples superficies de navegación alrededor de los objetos y/o una serie de puntos de interés en la superficie de estos. Y aunque es cierto que permiten resolver tareas complejas en geometrías complejas, pueden dar lugar a situaciones de inestabilidad durante su uso.

Esta tesis busca abrir una tercera vía, esto es, implementar una serie de técnicas de navegación que aúnen las ventajas de las diferentes estrategias presentadas. Se busca conservar la simplicidad de las técnicas de *Virtual Trackball* pero integrando la capacidad de adaptarse a la geometría de los objetos con los que se está trabajando. A tal efecto la

¹ Se habló con más detalle de las metáforas de navegación en la sección 2.1.

adaptación propuesta estará basada en la forma general de los objetos, ignorando las irregularidades de bajo grado. Estas, según nuestro criterio, no son muy relevantes para las tareas más comunes como son, por ejemplo, las tareas de inspección, aunque sí que pudieran serlo en tareas más específicas.

Buscando lograr el objetivo descrito en el ámbito de esta tesis se proponen dos técnicas distintas, ambas basadas en el empleo de elipsoides virtuales en vez de esferas. En la próxima la sección, 3.2 Navegación esferoïdal, se va a presentar un sistema de navegación basado en esferoïdes y en la sección 3.3 Navegación elipsoidal una generalización basada en elipsoides. Ambas técnicas están orientados a su uso mediante dispositivos con pocos grados de libertad y parten de la técnica de *TAV with fixed vector*, la cual va a ser extendida de forma que se adapte a la geometría de los objetos.

3.2 Navegación esferoïdal

La primera técnica de navegación que se propone en esta tesis es una extensión de las técnicas basadas en *virtual trackballs* en la que se hace uso de esferoïdes en lugar de esferas. Es decir, los objetos serán envueltos por esferoïdes virtuales y la cámara se moverá sobre la superficie de estos. De esta forma se consigue una mejor adaptación a la forma de los objetos, lo que según nuestra hipótesis tendrá un impacto positivo en la usabilidad.

3.2.1 Formulación Teórica

En este apartado, comenzaremos describiendo las propiedades matemáticas de los esferoïdes. Continuaremos clasificando los objetos en función su extensión en los tres ejes y del concepto de eje de rotación preferido en el modelo mental del usuario. A continuación, se presentará el concepto de *virtual trackball* usando esferoïdes, se clasificarán los

posibles movimientos de la cámara y se repasarán algunos conceptos matemáticos básicos de las elipses.

3.2.1.1 Esferoides

Se define *esferoide*¹ como un elipsoide² en el cual dos de sus ejes tienen la misma longitud. Se les llama también *elipsoides de revolución*, ya que el elipsoide es invariante bajo una rotación alrededor del tercer eje. En la Figura 21 se pueden ver tres ejemplos de elipsoides, un elipsoide genérico o triaxial a la izquierda y un par de esferoides en el centro y a la derecha.

Un esferoide se puede obtener mediante la rotación de una elipse alrededor de uno de sus semiejes, tal y como se puede intuir en la Figura 21. Si la elipse es rotada alrededor de su semieje mayor el resultado es un *esferoide oblongo* (también llamado alargado o prolato), Figura 21c. Si se rota alrededor del semieje menor el resultado es un esferoide de *tipo oblatos*³ (también llamado aplanado o achatado por los polos) tal y como se muestra en la Figura 21b. Ejemplo de esferoides oblongo y oblatos son respectivamente, por ejemplo, un balón de rugby y una lenteja.

Un elipsoide genérico o triaxial centrado en el origen con sus semiejes en los ejes de coordenadas viene dado por la ecuación (1). Mientras que un esferoide en el que el eje de revolución o simetría está en el eje Y viene dado por la ecuación (2). Esta expresión surge de igualar los semiejes r_x y r_z en la ecuación del elipsoide triaxial. Si el eje de revolución

¹ Originariamente esferoide significaba “aproximadamente forma esférica”, es decir, una esfera con cualquier tipo de irregularidad se consideraba un esferoide.

² Un elipsoide se define como una superficie curva cerrada cuyas tres secciones ortogonales principales son elípticas. También se puede definir como una [cuádrica](#) análoga a la [elipse](#), pero en tres dimensiones.

³ El modelo actual de la Tierra, en cartografía y geodesia, es un esferoide oblatos (*Spheroid - Wikipedia*, s. f.; *World Geodetic System - Wikipedia*, s. f.)

fuese el eje X se obtendría la expresión (3), donde los que se igualan son r_y y r_z .

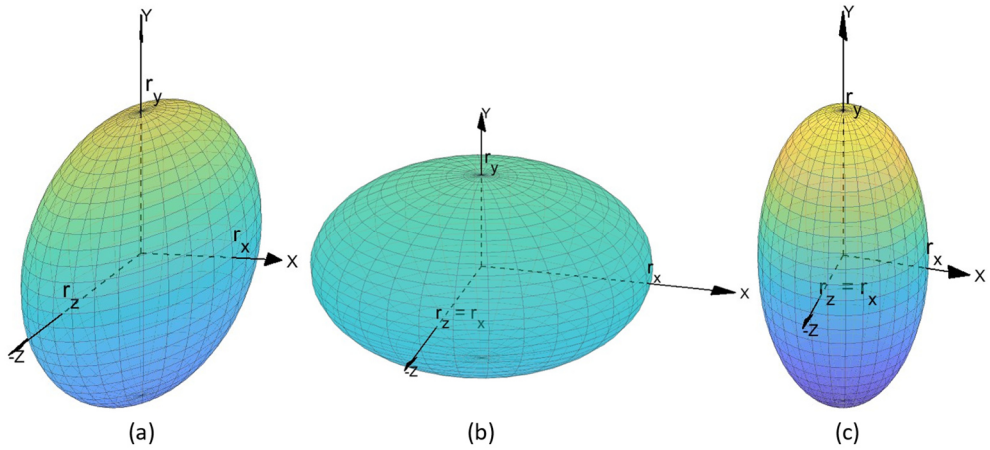


Figura 21. Se muestran tres elipsoides distintos. a) es un elipsoide en la cual sus tres semi-ejes r_x , r_y y r_z son distintos, llamado genérico o tri-axial. b) y c) son elipsoides en los cuales dos de sus tres semiejes son iguales, son llamados elipsoides de revolución o esferoides. b) Es un esferoide oblató ($r_y < r_x$) mientras que c) es un esferoide de tipo oblongo ($r_y > r_x$).

$$\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{y^2}{r_y^2} + \frac{z^2}{r_z^2} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{x^2 + z^2}{r_z^2} + \frac{y^2}{r_y^2} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{y^2 + z^2}{r_z^2} = 1 \quad (3)$$

En la sección 2 se estudió en detalle la importancia que tiene el eje preferido de rotación de un objeto en el modelo mental de un usuario. Haremos que este eje preferido de rotación sea el eje de revolución de los esferoides de navegación, jugando un papel equivalente al que jugaba el eje polar de la esfera en la técnica TAV clásica.

3.2.1.2 Tipos de objetos

En general se pueden imaginar casi infinitos ejemplos de objetos diferentes: podrían ser naturales, contruidos o fabricados por el hombre, biológicos, imaginarios, etc. En esta sección se tratará de analizar los objetos en función del eje de rotación preferido que tiene cada uno de ellos en el modelo mental de los usuarios. En la Figura 22 se pueden ver algunos ejemplos de objetos, algunos de los cuales pueden tener un eje de revolución claro para el lector, otros quizás no. Por supuesto, la hipótesis de partida es que todos estos objetos tienen un eje de rotación preferido en el modelo mental del usuario, aunque este no coincida entre usuarios. Este eje de rotación preferido nos va a permitir clasificarlos utilizando dos criterios:

- la orientación del eje de rotación preferido (vertical u horizontal)
- si la dimensión mayor del objeto coincide o no con la orientación de ese eje.

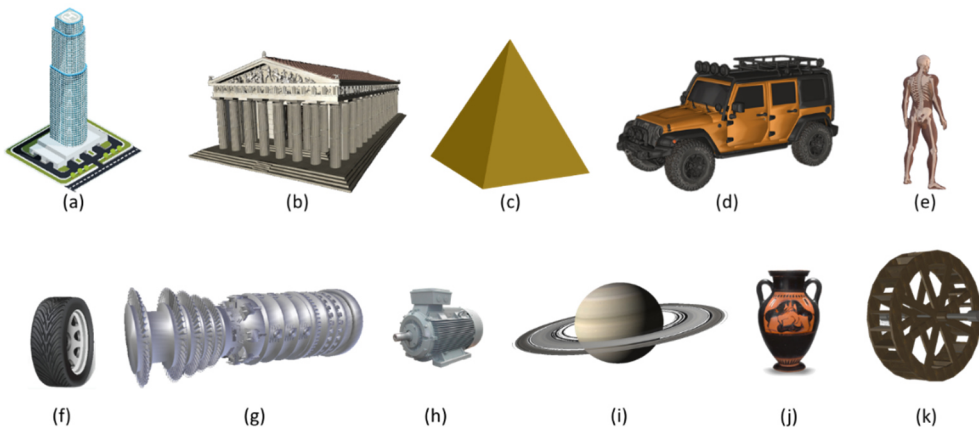


Figura 22. Ejemplos de objetos 3D. (a) y (d) Autor: *vectorpocket*, imagen de Freepik.com. (e) Autor: https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Bernhard_Ungerer, licencia Creative Commons Attribution 3.0 Unported. (i) Autor: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Jcpag2012>, licencia Creative Commons Attribution Share Alike 4.0 International license.

Este eje de rotación preferido que un objeto tiene en el modelo mental del usuario vendrá determinado por diferentes circunstancias. En una primera aproximación pudiera parecer que la geometría es el patrón determinante, pero no siempre es así. Por ejemplo, al observar los tres edificios presentes en la Figura 22 parece natural que tengan un eje de rotación vertical. Sin embargo, la geometría del Partenón es horizontal y no vertical.

Intentemos profundizar un poco más en esto. En los objetos cotidianos que normalmente vemos colocados sobre una superficie, como pueden ser un edificio o un jarrón, el modelo mental del usuario tenderá a imponerles un eje de rotación vertical, ya que intuitivamente se deseará que la dirección vertical permanezca siempre vertical incluso si se órbita alrededor. Además, esto parece independiente de la geometría del objeto en cuestión. En cambio, en los objetos que se nos presentan suspendidos en el espacio, sin una superficie de referencia, el modelo mental del usuario puede tener como prioridad un eje de rotación horizontal. Aunque en este caso puede depender de cada geometría individual, como se puede ver con la rueda, la turbina de vapor y el motor eléctrico de la Figura 22.

En cuanto al segundo criterio que se va a utilizar para clasificar los objetos, la relación entre la geometría del objeto y el eje de rotación preferido en el modelo mental del usuario. Si este eje de revolución coincide con el lado mayor del objeto hablaremos de *objetos alargados*¹. Ejemplos de este tipo de objetos son el rascacielos, la pirámide, la turbina de vapor, el motor eléctrico, el jarrón y el cuerpo humano. Cuando ocurre lo contrario, es decir, su eje de rotación no coincide con el lado mayor,

¹ Obsérvese que los objetos con una gran extensión en uno de los ejes y extensiones pequeñas similares en los otros dos, como un autobús, suelen describirse como alargados, pero en esta tesis, utilizaremos el término alargado sólo para aquellos objetos en los que el eje más largo coincide con el eje de rotación preferido. En este sentido, un autobús sería un objeto achatado.

hablaremos de *objetos achatados*. Ejemplos de ello, el Partenón, el coche, el planeta Saturno, la rueda del coche y el molino de agua.

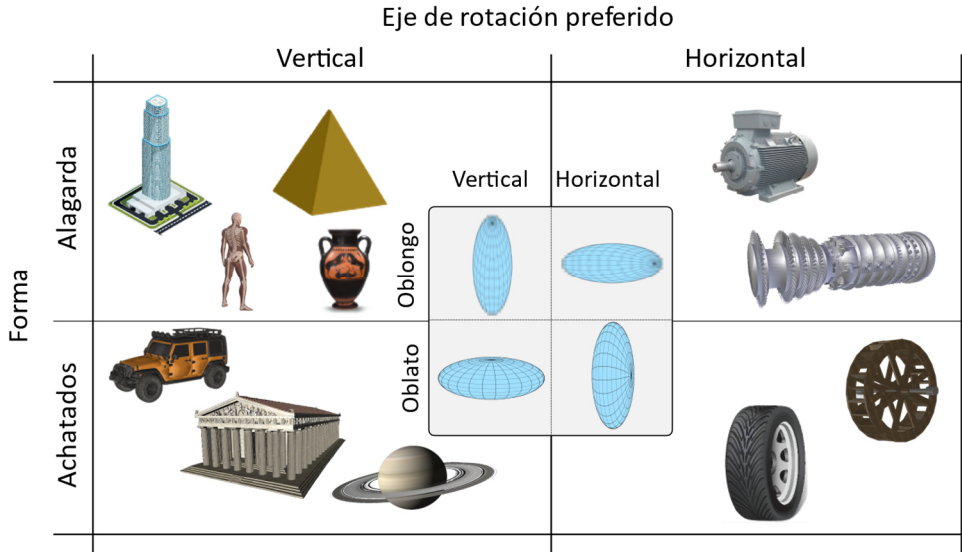


Figura 23. Clasificación propuesta de los objetos presentados.

Dada esta clasificación se puede ahora estudiar qué esferoides se ajustarían mejor a cada tipo de objeto. Tal y como se presenta en la Figura 23 parece tener sentido usar los esferoides de tipo oblongo para ajustarse a objetos con forma alargada y esferoides de tipo oblato para ajustarse a los objetos achatados. El eje de revolución del esferoide se ajustará al eje preferido que tiene el objeto en el modelo mental del usuario. En realidad, esta clasificación se ajusta al modelo mental de un supuesto usuario tipo, pudiera existir otro usuario que con un modelo mental distinto para alguno de los objetos presentados.

3.2.1.3 Virtual track-spheroid

La técnica de navegación que se propone es una variante de las técnicas TAV, así pues, formaría parte de las técnicas conocidas como de *virtual trackball*. Sin embargo, en lugar de usar una esfera virtual que encierre el objeto se propone usar un esferoide, por lo que sería entonces más acertado describirla como un *TAV virtual track-spheroid*.

Una diferencia importante entre la técnica propuesta aquí y la metáfora del *virtual trackball* es que, en esta última, lo que se mueve es el objeto. La interacción del usuario se mapea en giros de la esfera virtual, la cual contiene al objeto. Sin embargo, en nuestra metáfora es la cámara la que se mueve, orbita mientras que el objeto permanece fijo. Sin embargo, la interacción del usuario se va a mapear de tal forma que los movimientos de la cámara sean equivalentes a los giros de la esfera realizados en la metáfora del *trackball virtual*. De esta forma, desde el punto de vista de un usuario no existirá diferencia.

La técnica propuesta sitúa la cámara en la superficie de un esferoide que envuelve el objeto y permite su movimiento siguiendo un conjunto de trayectorias restringidas sobre esta superficie. *La implementación propuesta tomará ventaja de que un esferoide se puede construir como una elipse que se hace girar alrededor de uno de sus semiejes*. De tal forma que, la cámara se moverá siguiendo una trayectoria elíptica situada sobre un plano, el cual puede rotar alrededor de uno de los semiejes de esa elipse. Se denominarán, respectivamente, *trayectoria elíptica* o *de translación y plano de rotación*.

El eje de rotación preferido del objeto determinará la orientación de plano que contiene la elipse y su eje de rotación. Para objetos con un eje de rotación preferido vertical la elipse se situará en el plano vertical y girará alrededor del eje Y. Cuando el eje de rotación preferido sea horizontal, la elipse se situará en el plano horizontal y girará alrededor del eje X. Ver Figura 24 a y b, respectivamente¹.

Centrándose en la interacción, habría que considerar el dispositivo de interacción utilizado (ya sea ratón, *trackpad*, pantalla táctil o cualquier otro) y los posibles gestos que el usuario pudiera realizar con ellos. En este sentido, se propone que sólo se mapeen dos grados de libertad para la navegación y que además lo hagan en movimientos horizontales o

¹ En esta tesis se considera que Y es eje vertical de la escena 3D

verticales sobre la pantalla. Consecuentemente a partir de ahora los referiremos como *gestos horizontales* y *verticales*.

Cuando el eje de rotación preferido es vertical, tal y como se muestra en la Figura 24a, los gestos verticales se mapearán como movimientos de la cámara siguiendo la trayectoria elíptica (flechas azules en la imagen). Los gestos horizontales se mapearán como rotaciones del plano alrededor del eje Y del mundo (flecha violeta). Para los objetos cuyo eje preferido de rotación es horizontal tenemos la situación equivalente, detallada en la Figura 24b. Para el usuario, en la práctica, se trata del mismo esquema de interacción que se presentó para la técnica TAV de eje fijo en la Figura 3 de la sección 2.2, pero empleando elipses en vez de esferas.

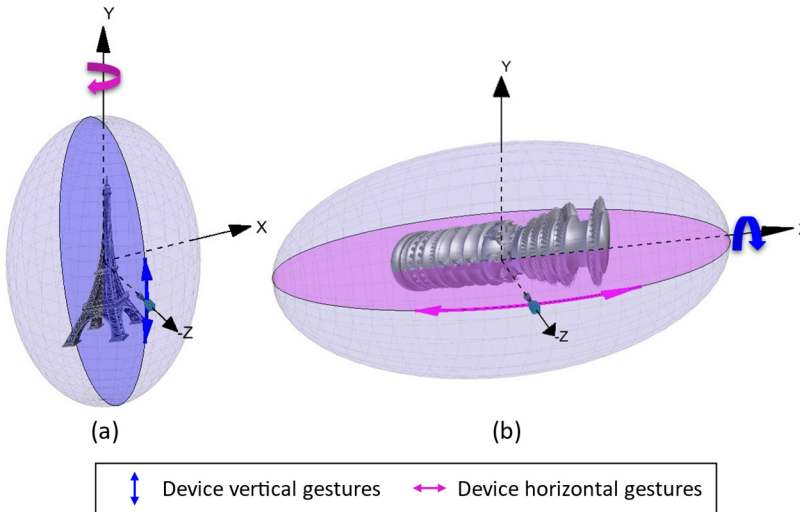


Figura 24. Se muestra el plano de rotación para objetos con eje de rotación preferido vertical (a) y horizontal (b). En (a) los gestos verticales se mapean en movimientos de la cámara siguiendo la elipse de translación y los horizontales en rotaciones del plano. En (b) ocurre lo contrario.

La técnica propuesta define los semiejes de la elipse en función la geometría del objeto, buscando que el esferoide generado, sea oblongo u oblató, se adapte de la mejor forma posible al objeto. En el caso en que los dos semiejes sean iguales nuestra técnica se convierte de manera automática en un TAV, *trackball virtual*, clásico.

A lo largo del resto apartados de este capítulo 3.2 se estudiará cómo ajustar estas elipses a la forma de los objetos y cómo realizar el mapeo de los gestos de interacción en los movimientos de traslación y rotación de la cámara.

3.2.1.4 Longitud, latitud y radio

La cámara solo podrá seguir dos tipos de trayectorias sobre la superficie del elipsoide. Se utilizará el término *latitud* para referirse a los movimientos de la cámara a lo largo de la trayectoria elíptica. Y para los movimientos de la cámara alrededor del eje de rotación del objeto se utilizará el término *longitud*. Por tanto, los gestos de los usuarios con el dispositivo de interacción se deben mapear en estos movimientos de *latitud* y *longitud*.

Cuando el eje de rotación preferido del objeto es el vertical, los movimientos en longitud y latitud coinciden con los utilizados clásicamente en las coordenadas geográficas, como se puede ver en a Figura 25a. Sin embargo, cuando el eje de rotación es horizontal la situación sufre una rotación, tal y como puede verse en la Figura 25b. Ambos casos se ajustan a la definición planteada.

Mediante esta terminología se pretende delimitar las diferencias a como se mapean los gestos del dispositivo de interacción en los movimientos longitudinales y latitudinales de la cámara para cada caso, simplificando de esta forma el resto de la notación. Como se realiza el mapeo de los dispositivos de interacción se explorará más adelante.

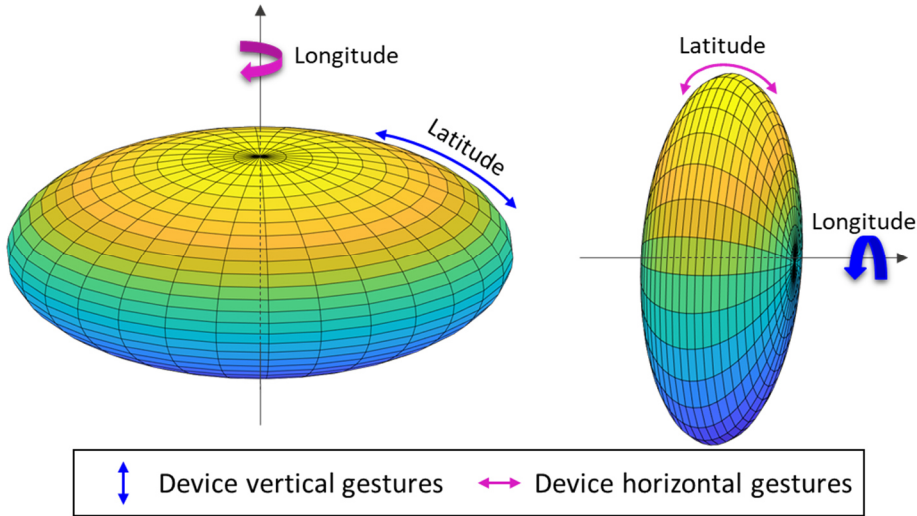


Figura 25. Movimientos de la cámara expresados mediante los conceptos de coordenadas geográficas de longitud y latitud. En la izq. se muestra el caso de eje de rotación vertical. A la drcha. se muestra una extensión del concepto cuando el eje es horizontal.

El tercer movimiento posible de la cámara en nuestro paradigma es el movimiento *radial*. Consiste en el movimiento que acercaría o alejaría la cámara del objeto. Esto significa que el esferoide virtual sobre el que se mueve la cámara cambiará su tamaño. Se trata, pues, de un cambio en los radios del esferoide.

3.2.1.5 Ecuaciones de la trayectoria elíptica

Los movimientos de la cámara en latitud siguen una trayectoria elíptica, que en el caso de un eje de rotación vertical estará contenida en un plano vertical. Su ecuación, en el plano YZ y centrada en el origen de coordenadas, viene dada por la expresión (4). Esta trayectoria queda entonces determinada por la longitud de los semiejes de la elipse, expresados como r_y y r_z . Al mayor de ellos se le denomina semieje mayor y al contrario semieje menor.

$$\frac{y^2}{r_y^2} + \frac{z^2}{r_z^2} = 1 \quad (4)$$

La rotación de esta elipse alrededor del eje Y da lugar a un esferoide de tipo oblongo cuando el semieje mayor se encuentra en este eje Y ($r_y > r_z$). Intercambiando la posición de semieje mayor y menor ($r_y < r_z$), tendríamos el caso de un esferoide oblató, al rotar alrededor del eje Y.

Si se analiza el caso de un eje de rotación horizontal la trayectoria elíptica se encontraría contenida en el plano horizontal y vendría descrita por la expresión (5), en plano XZ y centrada en el origen. La rotación de esta elipse alrededor del eje X dará lugar a un esferoide oblongo si $r_x > r_z$, y a un esferoide oblató en caso contrario.

$$\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{z^2}{r_z^2} = 1 \quad (5)$$

En multitud de ocasiones es más conveniente utilizar las versiones paramétricas de las ecuaciones (4) y (5), presentadas respectivamente en las ecuaciones (6) y (7). Estas ecuaciones proporcionan los puntos de la trayectoria elíptica en función de un parámetro t , que se denomina *anomalía excéntrica de la elipse*¹. En la Figura 26 se muestra la representación de un punto $p = (x, z)$ para un valor dado de t .

$$p = (y, z) = (r_y \cos t, r_z \sin t) \quad t \in [0, 2\pi] \quad (6)$$

$$p = (x, z) = (r_x \cos t, r_z \sin t) \quad t \in [0, 2\pi] \quad (7)$$

¹ Hay que señalar que t no es el ángulo real entre OP y el eje X, su significado geométrico se representa en la Figura 26.

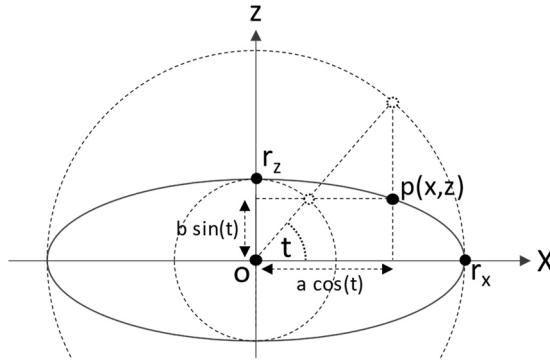


Figura 26. Representación de un punto p de la elipse en función de su ecuación paramétrica. El parámetro p se denomina anomalía excéntrica de la elipse.

3.2.2 Decisiones de diseño

En este apartado se van a exponer algunas de las decisiones de diseño necesarias para dar respuesta a todas las cuestiones que surgen en la implementación de un sistema de navegación basado en esferoides.

El problema a resolver parte de un objeto tridimensional y una posición inicial de la cámara. La solución pasa por encontrar una elipse que contenga esa posición propuesta para la cámara y que rodee al objeto manteniéndolo centrado y sin tocarlo. Asimismo, forma parte del problema, decidir en qué dirección enfocará la cámara en cada uno de los puntos de esa elipse.

Una primera decisión de diseño es asumir que toda la información geométrica del objeto que se va a emplear será reducida únicamente a su *bounding box*. Esto va a permitir adaptarse a la forma del objeto sin perderse en detalles de bajo nivel de su geometría. Y es consistente con el propósito fundamental de la técnica implementada, ser capaz de adaptarse a la forma de los objetos manteniendo toda simplicidad posible.

3.2.2.1 Posición inicial de la cámara

La siguiente suposición que se va a realizar es asumir que el centro del objeto está localizado siempre en el origen de coordenadas. Esto no presenta el mayor problema, ya que si no fuese así basta con mover el origen de coordenadas de la elipse a ese punto.

En cuanto a la cámara, aunque en principio podría estar en cualquier posición inicial, se asumirá que su posición inicial está siempre situada sobre el eje Z. De tal forma que las coordenadas de su posición inicial serán siempre del tipo $(0, 0, Z_0)$. Al igual que antes, si esto no fuese así se podría hacer una transformación para llegar a esta situación y una transformación de vuelta al problema inicial. En la Figura 27 muestra este escenario para dos tipos de objetos diferentes, donde se va a suponer que el eje X es el eje de rotación preferido en ambos casos. Se representa la proyección de la *bounding box* de los objetos sobre el plano XZ. En el caso de la izquierda el esferoide resultante al rotar la elipse sería de tipo oblongo, mientras que a la derecha sería de tipo oblató.

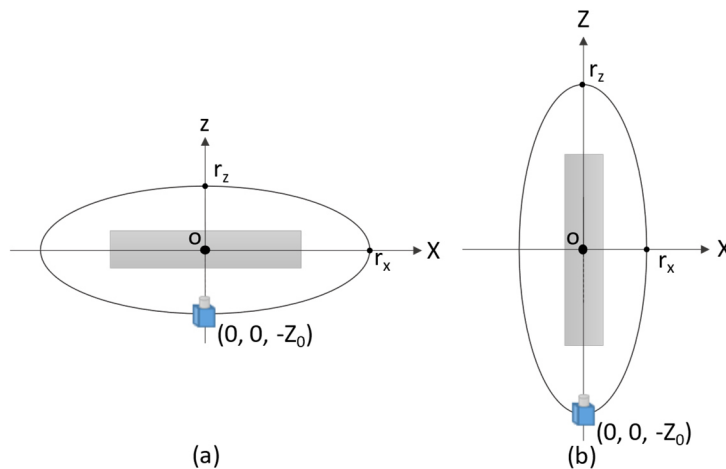


Figura 27. Posición inicial de la cámara que se va a asumir de aquí en adelante. Se muestran dos situaciones, ambas con eje de rotación horizontal, sobre el plano XZ. La situación (a) da lugar a un esferoide oblongo, la situación (b) a uno oblató.

3.2.2.2 Orientación de la cámara

Cómo orientar la cámara es un problema que no tiene una solución única. En el caso de la navegación esférica parece no haber duda, la cámara siempre se orienta mirando hacia el centro de la esfera. Sin embargo, emplear esa solución en el caso de la navegación esferoidal haría que se perdiesen las ventajas que esta aporta.

Cuando la cámara se mueve a lo largo de la elipse está en realidad haciendo lo que se conoce como un *travelling*, siguiendo aproximadamente la superficie del objeto. Este efecto, que se ha mostrado en la Figura 29a, sugiere que no tiene sentido que la cámara mirase a un punto fijo durante ese recorrido. En lugar de eso, la solución deseada debería enfocar la cámara sobre las partes del objeto sobre las que está pasando. Al llegar a los extremos de la elipse debería, además, girar gradualmente para evitar cualquier efecto visual extraño.

Teniendo estos requisitos en mente, la solución adoptada pasa por orientar la cámara perpendicularmente a la elipse y hacia el centro de curvatura de esta en el punto donde se encuentra. Esta decisión va a suponer que la cámara siempre este mirando en una dirección contenida en el plano de la elipse de translación. Para resolver este problema se debe encontrar la ecuación o ecuaciones de las líneas perpendiculares a la elipse en cada uno de sus puntos. Se van a presentar aquí las soluciones para el caso de eje de rotación horizontal en el plano XZ

Se comenzará analizando el caso de los *esferoides oblongos horizontales*. En esta situación el semieje mayor de la elipse de translación está situado sobre el eje X, como se puede observar en la Figura 28. Por otro lado, existe una propiedad importante de las perpendiculares a una elipse, por construcción siempre van a cortar primero al semieje mayor de la misma. En consecuencia, si se supone la cámara situada en un punto cualquiera de la elipse $p_0 = (x_0, z_0)$, las

líneas perpendiculares a la misma cortaran al eje X en un punto que llamaremos $p_{corte} = (x_c, 0)$.

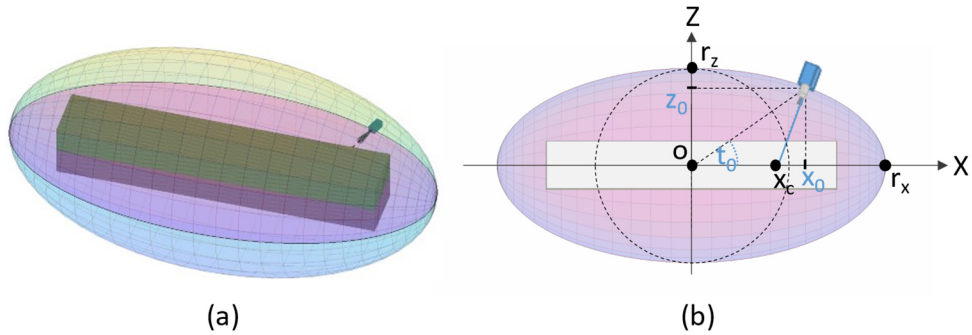


Figura 28. Ilustración de la obtención del punto al que mirar la cámara para un objeto alargado encapsulado a un esferoide oblongo. En (a) se muestra el problema tridimensional con la elipse de translación, mientras que en (b) se muestra el problema sobre el plano horizontal.

Partiendo ahora de la ecuación paramétrica de la elipse en el plano horizontal (7) y de la ecuación de la recta normal a la elipse en el punto p se puede plantear el siguiente sistema, donde m_N es la pendiente de dicha recta normal.

$$p = (x_0, z_0) = (r_x \cos t_0, r_z \sin t_0) \left. \begin{array}{l} z - z_0 = m_N(x - x_0) \\ z - r_z \sin t_0 = m_N(x - r_x \cos t_0) \end{array} \right\} \quad (8)$$

La pendiente de la recta normal se puede obtener recordando que su relación con la recta tangencial a la curva en un punto viene dada por la expresión $m_N = -\frac{1}{m_T}$. Y la pendiente de la recta tangencial a la elipse (m_T) en un punto t_0 se va a obtener a partir de las derivadas de las ecuaciones paramétricas en ese punto, tal y como se muestra en (9).

$$m_T = \frac{dz}{dx} = \frac{(b \sin t_0)'}{(a \cos t_0)'} = \frac{-b t_0 \cos t_0}{a t_0 \sin t_0} = -\frac{b \cos t_0}{a \sin t_0} \quad (9)$$

Se puede ya obtener, a partir los resultados previos, la expresión (10), que proporciona la dirección en la que debe mirar la cámara en cada uno de los puntos de la elipse, para el caso de un esferoide oblongo.

$$z = \frac{r_x}{r_z} \frac{\sin t_0}{\cos t_0} x + \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t_0 \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (10)$$

En la práctica es más sencillo si se conoce a que punto debe mirar la cámara en cada momento, para eso a partir de esta ecuación se calcular el punto de corte con el eje X obteniéndose la expresión (11), mediante la cual se puede saber el punto al que debe mirar la cámara en cada punto de la elipse de translación.

$$x_c = x|_{z=0} = \left(r_x - \frac{r_z^2}{r_x} \right) \cos t_0 \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (11)$$

Ahora bien, no se debe olvidar que el problema a resolver era tridimensional, se estaba buscando la orientación de la cámara en cada punto de un esferoide oblongo. Como se ha visto, el semieje mayor de la elipse coincide con el eje de rotación, eje X al estar en el caso de eje de rotación horizontal. Ya que las perpendiculares a una elipse siempre apunta a su semieje mayor, se puede deducir que la cámara siempre estará mirando a un punto del eje X, da igual el movimiento que realice. Se llega entonces a la expresión (12), que resuelve el punto al que debe mirar la cámara para cualquier posición sobre el esferoide virtual oblongo.

$$p_{enfoque} = \left[\left(r_x - \frac{r_z^2}{r_x} \right) \cos t_0, 0, 0 \right] \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (12)$$

En la Figura 29 se muestran gráficamente los valores de la expresión obtenida para distintas posiciones de la cámara, cuando se realizan movimientos de translación y de rotación. Como se puede observar la cámara realiza un *travelling* sobre la superficie del objeto y está en todo momento mirando hacia un punto contenido en el eje X.

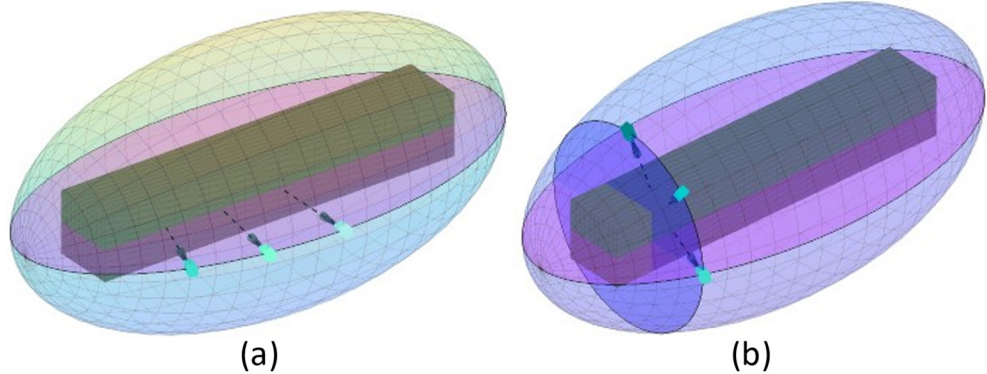


Figura 29. Evolución de la orientación de la cámara en su movimiento por la superficie de un esferoide oblongo. El movimiento empieza en (a) y termina en (b), de posiciones más clara a más oscura de la cámara. En (a) se muestra un movimiento de translación y en (b) un movimiento de rotación. En rosa la elipse de translación en el plano, en azul la trayectoria circular de rotación.

Un análisis equivalente se puede hacer para el caso de un esferoide oblongo con eje de rotación vertical. En ese caso el punto al que enfocará la cámara en todo momento estará contenido en el eje Y, obteniéndose en ese caso que la siguiente expresión.

$$p_{enfocue} = \left[0, \left(r_y - \frac{r_z^2}{r_y} \right) \cos t_0, 0 \right] \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (13)$$

Quedaría ahora por analizar el caso de los *esferoides oblatos*. En esta ocasión es el semieje menor de la elipse de translación el que está situado sobre el eje X. Por consiguiente, en el plano horizontal las perpendiculares a la elipse cortarán en todo momento al eje Z, tal y como se ha reflejado en la Figura 30. Siguiendo un análisis paralelo al anterior se obtendría la expresión siguiente:

$$z = \frac{r_z}{r_x} \frac{\sin t_0}{\cos t_0} x + \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t_0 \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (14)$$

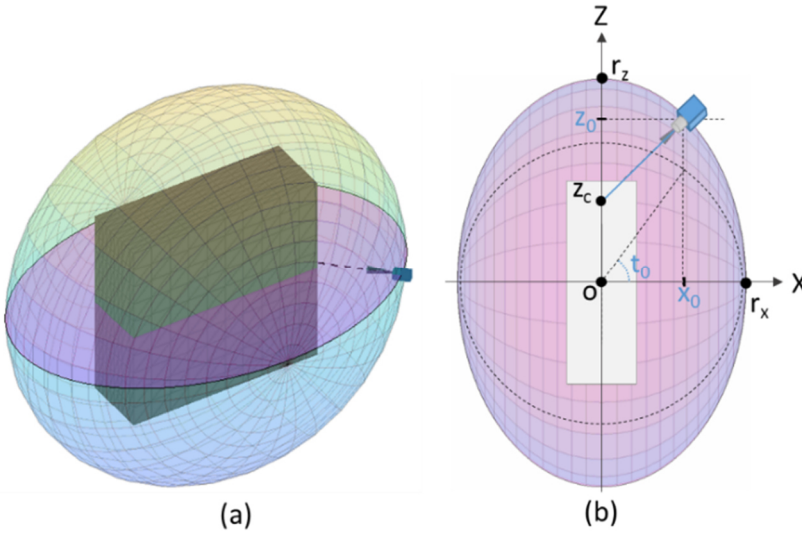


Figura 30. Ilustración de la obtención del punto al que debe mirar la cámara para un esferoide oblato. En (a) se muestra el problema tridimensional con la elipse de translación, mientras que en (b) se muestra el problema sobre el plano horizontal.

Con esta ecuación (14) se puede calcular el punto de corte con el eje Z, obteniéndose la expresión (15). Mediante la cual se puede saber el punto al que debe mirar la cámara en cada punto de la elipse de translación, cuando esta se encuentra situada en el plano horizontal.

$$z_c = z|_{x=0} = \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t_0 \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (15)$$

Cuando ahora se busca la expresión de la orientación de la cámara en cada punto de un esferoide oblato, no solo en el plano horizontal, aparece una diferencia fundamental respecto al caso previo. Esto es porque ahora el semieje mayor de la elipse no coincide con el eje de rotación, salvo en el plano. Por tanto, en los movimientos de rotación la cámara no va a estar siempre mirando al eje de rotación, sino que seguirá un movimiento circular en un plano vertical. El punto de enfoque de la

cámara es, por tanto, dependiente del ángulo de rotación en cada momento. Se llega entonces a la expresión (16), que proporciona el punto al que debe enfocar la cámara para cualquier posición en el esferoide virtual oblató.

$$p_{enfoc} = \left[0, \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t_0 \sin \theta, \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t_0 \cos \theta \right] \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (16)$$

En la Figura 31 se muestra el punto de enfoque de la cámara para movimientos de traslación y de rotación con un esferoide oblató. Se puede apreciar como el comportamiento en rotación, aun siendo distinto al de los esferoides oblongos, sigue cumpliendo los objetivos planeados al principio de este análisis.

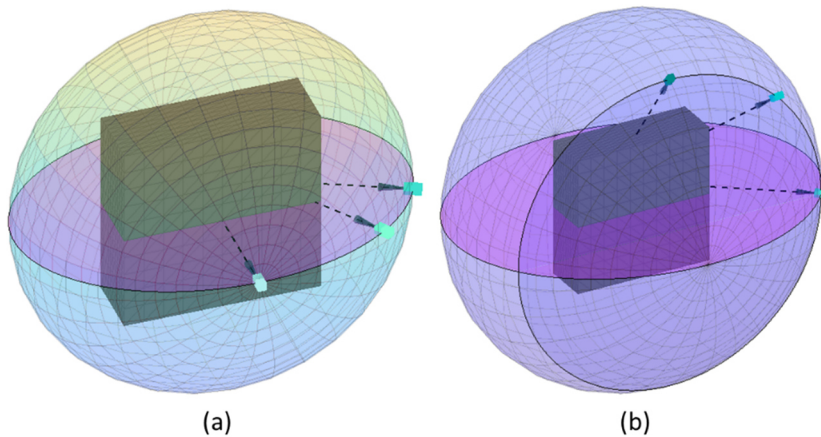


Figura 31. Evolución de la orientación de la cámara a lo largo de su movimiento sobre la superficie del esferoide. El movimiento empieza en (a), de posición más clara a más oscura, y continua en (b). En (a) se muestra un movimiento de traslación y en (b) un movimiento de rotación. La elipse de traslación inicial en el plano se muestra en rosa, mientras que en azul la trayectoria circular de rotación.

Si se realiza un análisis equivalente para el caso de *esferoide oblatos con eje de rotación vertical* se obtendría la expresión siguiente:

$$p_{enfoq} = \left[\left(r_z - \frac{r_y^2}{r_z} \right) \sin t_0 \cos \theta, 0, \left(r_z - \frac{r_y^2}{r_z} \right) \sin t_0 \sin \theta \right] \quad t_0 \in [0, 2\pi] \quad (17)$$

Si se examinan detenidamente las expresiones que se han obtenido, se revelará un resultado de considerable importancia. Para lograr este objetivo, se retoman las expresiones (11) y (15), y se representan gráficamente (consultar la Figura 32). En la situación oblonga, en el momento en que la cámara se encuentra posicionada en el eje Z ($t = \pi/2$), su enfoque se centrará en el punto $x_c = 0$. A medida que la cámara progresa hacia el extremo del objeto con valores de $t = 0$ ó π , el enfoque de la cámara se desplaza gradualmente a lo largo del eje, llegando a su punto máximo en $x_{cmax} = \pm \left(r_x - \frac{r_z^2}{r_x} \right)$. En el caso de la Figura 32b, que corresponde al escenario oblatos, cuando la cámara se ubica sobre el eje X ($t = 0$), su enfoque se sitúa en el punto $z_c = 0$. Conforme la cámara se desplaza hacia el extremo del objeto con valores de $t = \pm \pi/2$, su posición de enfoque se desplaza sobre el eje, alcanzando nuevamente un punto máximo en $z_{cmax} = \pm \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right)$.

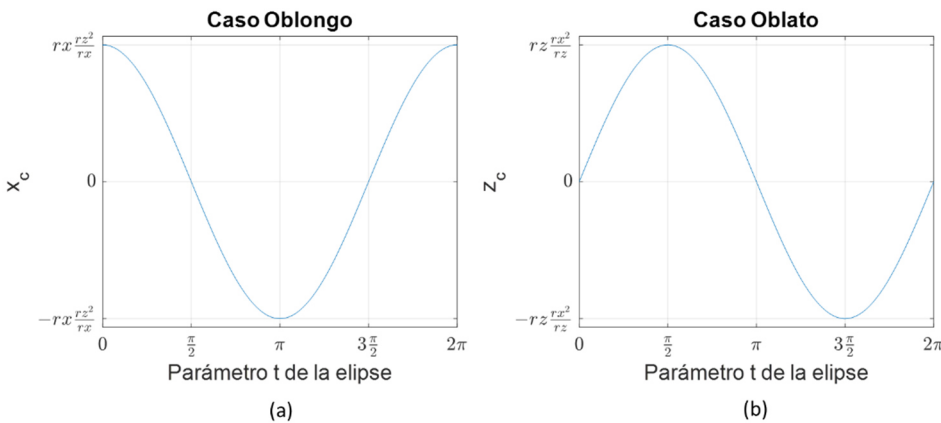


Figura 32. Gráficas que muestran el punto de enfoque de la cámara sobre el eje de rotación horizontal en función del parámetro t , para los casos oblongo y oblatos.

Resulta por tanto evidente, tras analizar las gráficas, que el conjunto de valores posibles que el punto enfocado por la cámara puede tomar no abarca la totalidad del rango del semieje mayor de la elipse, sino que está limitado en su extensión. La existencia de este punto asintótico tiene consecuencias que van a ser consideradas en el siguiente apartado. Finalmente, con el objetivo de observar todo el rango de puntos de enfoques de la cámara, para ambos casos, se han graficado estos resultados sobre las elipses en el plano horizontal, ver Figura 33.

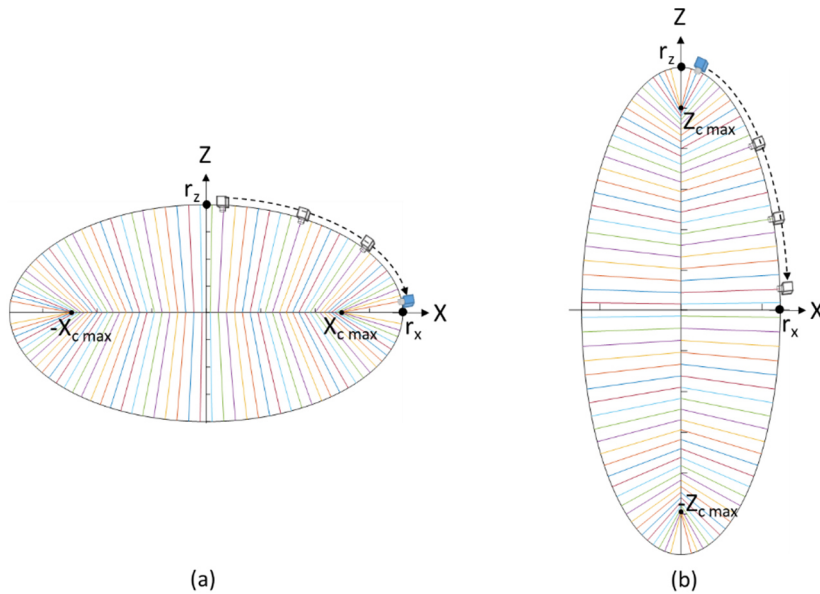


Figura 33. Evolución de la dirección de enfoque de la cámara durante los movimientos sobre la elipse de translación en el plano horizontal, para el caso oblongo (a) y oblató (b).

3.2.2.3 Definición de la elipse de trayectoria

Dada una posición inicial para la cámara queda aún por concretar cual es exactamente la elipse por la que se realizan los movimientos de translación. Una elipse queda definida por la posición de su centro y el valor de sus dos radios o semiejes. Dados estos valores, las posiciones que la cámara puede ocupar vendrán dadas para la solución de la ecuación

paramétrica (6) o (7), según el caso, para los distintos valores del parámetro t .

Por simplicidad, ya que se ha supuesto que el centro de la *bounding box* del objeto se encuentra en el origen de coordenadas, vamos a colocar el centro de la elipse también en el origen de coordenadas. Pese a esto el problema sigue teniendo múltiples soluciones, quedan por determinar dos grados de libertad, el valor de los dos semiejes, y se tiene una única solución de contorno, la posición de la cámara. Se hace entonces necesario imponer condiciones adicionales para resolver esta ambigüedad. La estrategia va a consistir en imponer una relación extra que estará basada en la geometría del objeto y en la característica asintótica del punto de corte de las líneas perpendiculares a la elipse con el eje de rotación. Para ello es necesario antes introducir un concepto, asociado a las normales de una curva, que nos va a ser de utilidad.

En el apartado anterior se demostró que existe una asíntota para el punto de corte entre las perpendiculares a una elipse y el semieje mayor de esta. Este punto asintótico es conocido como la cúspide de la evoluta de la elipse en el semieje mayor. De tal forma que, generalizando los resultados previos, obtenemos la expresión (18) donde E_c (*Evolute cusp*) es este punto asintótico, y donde a y b representan a los semiejes de la elipse, siendo siempre $a > b$.

$$E_c = \left(a - \frac{b^2}{a} \right) \quad \text{donde } a > b \quad (18)$$

Una evoluta es el lugar de los centros de curvatura (la envolvente) de las normales de una curva plana, (Weisstein, 2020). Y se cumple que, la dirección de la recta tangente a la evoluta es normal a la elipse, es decir, *la evoluta es la envolvente de las normales a la elipse*. La evoluta de una elipse tiene la forma de una astroide alargada, a veces conocido como la curva de Lamé (Weisstein, 2020a). Los límites de este astroide en los ejes se llaman *cúspides*. En la Figura 34 se ha representado una elipse y su evoluta en rojo.

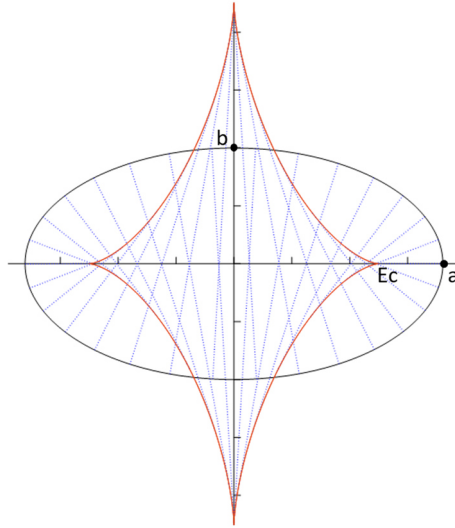


Figura 34. Representación de una elipse (en negro), sus normales (en azul) y su evoluta (rojo). La evoluta de una elipse es una astroide alargada, también conocida como curva de Lamé.

Regresemos ahora al objetivo de encontrar una relación entre la geometría del objeto y este punto E_c , con el objeto de poder finalmente definir una elipse de traslación óptima. Supongamos un objeto genérico centrado en el eje X, cuya *bounding box* tiene dimensión $2e_x$ en ese eje. En este caso, podrían darse dos situaciones extremas, tal y como se muestra en la Figura 35. Si el valor e_x fuese mayor que E_c habría partes del objeto que no serían enfocadas directamente por la cámara. Si ocurriese lo contrario, $e_x < E_c$, habría momentos en que la cámara se encontraría enfocando al vacío. Ambas son situaciones no deseadas para la interacción del usuario.

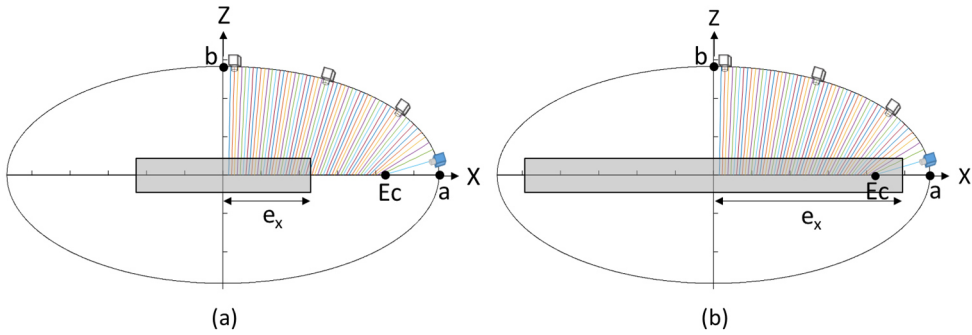


Figura 35. Proyección de la *bounding box* de un objeto sobre el plano XZ, la trayectoria elíptica de la cámara y las líneas normales a la elipse. En (a) se muestra que ocurriría sí el objeto fuese más pequeño que la cúspide de la evoluta, en (b) se muestra el caso contrario.

Para evitar ambas situaciones se va a elegir una elipse que garantice que el valor del punto asintótico coincide con el tamaño de la *bounding box* en el semieje mayor, es decir, $E_c = e_x$ en la situación analizada, ver Figura 36. En esta elipse ocurre ahora que el límite asintótico al que tienden las normales coincide con las dimensiones del objeto en el eje. Dicho de otra forma, se trata de una elipse en que la cámara estará siempre enfocada en una zona del objeto, durante todo su movimiento.

Con esta la relación, junto a una posición deseada para la cámara y las expresiones obtenidas en apartados anteriores, es ya posible dar solución al problema de definir la elipse de traslación inicial.

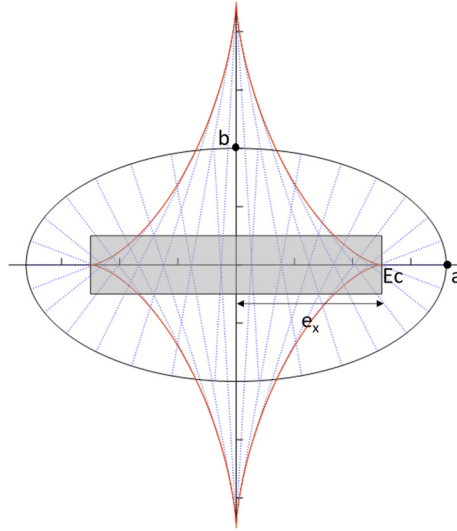


Figura 36. La relación entre los semiejes de la elipse se elegirá de tal forma que la cúspide de la evoluta se ajuste al borde de la proyección del objeto sobre el eje X.

Se comenzará abordando el caso de un esferoide oblongo con un eje de rotación horizontal, como se muestra en la Figura 37. Para ello se va a suponer que la cámara se encuentra inicialmente posicionada sobre una elipse de traslación en el plano horizontal, específicamente en la ubicación $(0, 0, -z_0)$. En esta configuración, el valor del semieje menor de la elipse será igual a z_0 ($b = z_0$) y el valor de E_c se iguala a e_x para garantizar que se enfoque al objeto en todo momento, tal y como se ha discutido previamente. Para resolver el problema solo quedaría calcular el valor del semieje mayor de la elipse a , que se puede obtener de la expresión (18), y lleva a la siguiente ecuación (19).

$$a = \frac{1}{2} \left(E_c + \sqrt{E_c^2 + 4b^2} \right) \quad (19)$$

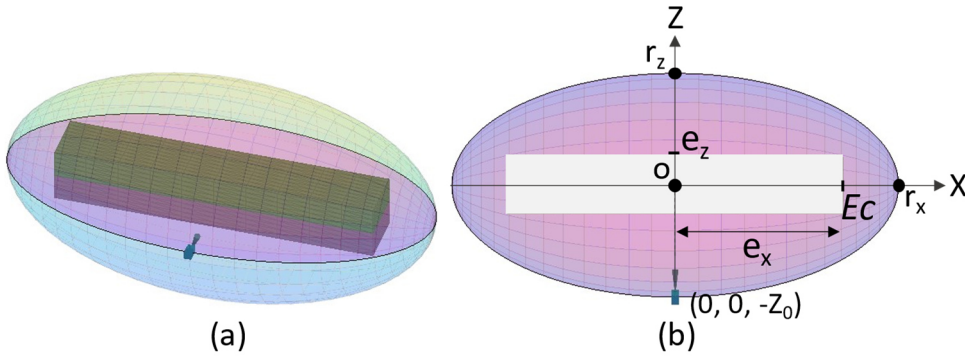


Figura 37. Ilustración del proceso de definición de la elipse de translación inicial de un esferoide oblongo con eje de rotación horizontal.

Se particulariza ahora este resultado para el caso oblongo horizontal, en el que ocurre que $a = r_x$ y $b = r_z$, como se puede ver en la Figura 37, obteniéndose la expresión (20). Esta expresión resuelve la obtención de la elipse de translación inicial; por ende, resuelve también el problema de la obtención del esferoide de navegación inicial, para el caso de esferoide oblongo.

$$\begin{cases} r_z = z_0 \\ r_x = \frac{1}{2} \left(e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_z^2} \right) \end{cases} \quad (20)$$

Se puede ahora actualizar la ecuación (13), que permite conocer el punto al que enfoca la cámara en todo momento, con esta nueva nomenclatura lo que lleva a la siguiente expresión.

$$p_{\text{enfoque}} = [E_c \cos t_0, 0, 0] \quad \text{donde} \begin{cases} E_c = e_x \\ t_0 \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (21)$$

Queda ahora resolver el problema de los esferoides *oblatos*, también con eje de rotación horizontal, problema mostrado en la Figura 38. En esta situación, es el valor del semieje mayor de la elipse el que se iguala a la posición inicial de la cámara, esto es, $a = z_0$. Sin embargo, en este caso la elección de E_c no es tan sencilla. Dado que el semieje mayor se encuentra alineado con el eje Z, las normales a la elipse intersecan este

eje y la cúspide de la evoluta (E_c) se ubica en este mismo. Esto llevaría a pensar que la relación a fijar para mantener la cámara enfocada en todo momento sobre el objeto sería $E_c = e_z$. Ahora bien, esta solución podría no ser la mejor.

En el caso de los esferoides oblatos, es preciso considerar las dimensiones del objeto en el eje Y, ya que este no necesariamente posee las mismas dimensiones en todos los ejes, tal como se representa en la Figura 38. Esto resulta relevante aquí debido a que, durante los movimientos de rotación, el semieje mayor de la elipse se desviará del plano horizontal. En otras palabras, la cámara no se enfoca en general en puntos ubicados en el eje Z, sino en puntos que se encuentran en el plano YZ. Este fenómeno se ha detallado de manera más exhaustiva en la sección anterior 3.2.2.2 Orientación de la cámara.

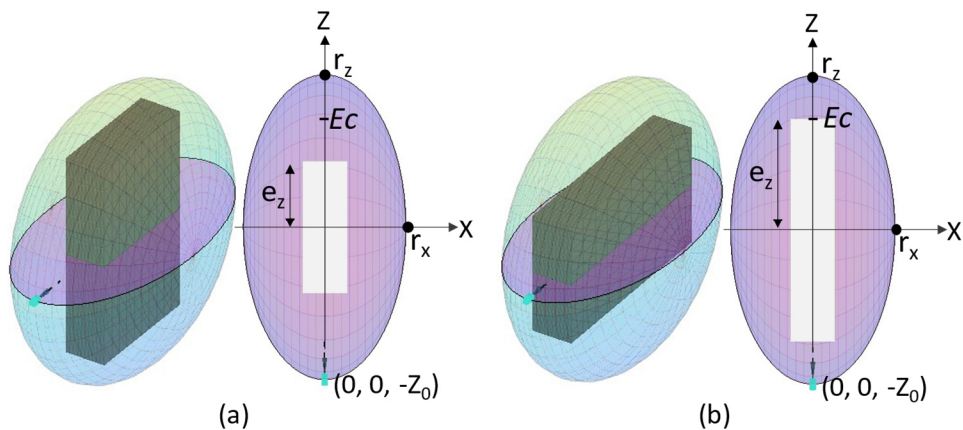


Figura 38. Dos ejemplos distintos del proceso de definición de la elipse de translación inicial de un esferoide oblato con eje de rotación horizontal. En ambos casos se muestran objetos en los que $e_z \neq e_y$. Por convenio se va a elegir siempre el mayor de los dos para definir la cúspide de la evoluta.

Todo este análisis nos lleva a la conclusión de que, al elegir el valor de E_c , es fundamental considerar las dimensiones del objeto en el plano perpendicular al eje de rotación, que en este caso es el plano YZ. Si la *bounding box* del objeto es igual en ambos ejes de este plano, entonces se

puede igualar E_c a $e_z = e_y$, lo que resolvería el problema de manera sencilla. Sin embargo, si el objeto es desigual en el plano vertical, $e_z \neq e_y$, es necesario seleccionar un valor de compromiso para E_c .

Se ha optado por elegir E_c como el mayor de e_z ó e_y . Esta elección se fundamenta en uno de los principios rectores de nuestra estrategia de navegación esferoidal, que es dar prioridad al *travelling* de la cámara durante los movimientos de translación a lo largo de la elipse. Esta decisión implica asumir que, durante la rotación, en uno de los planos se presentará la situación ilustrada en la Figura 35a. Este punto será examinado con mayor detalle en la sección 3.2.4, que aborda las limitaciones y desafíos de nuestro enfoque. En resumen, vamos a decir que E_c toma el valor de $e_{y/z}$ ($E_c = e_{y/z}$), donde $e_{y/z}$ representa el mayor de la pareja $\{e_y, e_z\}$.

Una vez se tienen los valores para el semieje mayor (a) y para E_c , falta solo obtener el valor de b , el semieje menor de la elipse. Se obtiene este despejando de la expresión (18) y se obtiene:

$$b = \sqrt{a^2 - a * E_c} \quad (22)$$

Particulariza este resultado para este oblongo horizontal, donde $a = r_z$ y $b = r_x$, como se ve en la Figura 38, se obtiene finalmente la expresión (23). La cual resuelve la obtención de la elipse de translación inicial para el caso oblató. En consecuencia, resuelve el problema de la obtención del esferoide de navegación inicial.

$$\begin{cases} r_z = z_0 \\ r_x = \sqrt{r_z^2 - r_z * e_{y/z}} \end{cases} \quad \text{donde} \quad e_{y/z} = \max [e_y, e_z] \quad (23)$$

Este resultado cambia la ecuación (16) que permitía conocer el punto al que enfoca la cámara en todo momento para el caso oblongo, lo que nos lleva a la siguiente ecuación.

$$p_{enfoque} = [0, E_c \sin t_0 \sin \theta, E_c \sin t_0 \cos \theta] \text{ donde } \begin{cases} E_c = e_{y/z} \\ t_0 \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (24)$$

Todo este análisis puede a su vez repetirse para objetos con eje de rotación preferido vertical. En ese caso la elipse de traslación se encontraría en el plano vertical y las rotaciones se realizan alrededor del eje Y. Los resultados que se obtendrían haciendo un cambio de variable en los ya obtenidos, de tal forma que se obtienen las expresiones (25), para el *caso vertical oblongo*, y (26) para *vertical oblató*.

$$\begin{cases} r_z = z_0 \\ r_y = \frac{1}{2} \left(e_y + \sqrt{e_y^2 + 4r_z^2} \right) \\ p_{enfoque} = [E_c \cos t_0, 0, 0] \end{cases} \text{ con } \begin{cases} E_c = e_y \\ t_0 \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} r_z = z_0 \\ r_y = \sqrt{r_z^2 - r_z * e_{x/z}} \\ p_{enfoque} = [E_c \sin t_0 \cos \theta, 0, E_c \sin t_0 \sin \theta] \end{cases} \text{ con } \begin{cases} E_c = e_{x/z} \\ t_0 \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (26)$$

3.2.3 Cálculos dinámicos de la posición de la cámara

En este apartado se estudiarán los cambios en la posición de la cámara en respuesta a los gestos realizados por el usuario mediante el dispositivo de interacción. Según estos gestos los cambios podrán ser de tres tipos, ver Figura 39. Un movimiento de la cámara siguiendo la trayectoria elíptica situada en el plano (*cambio en la latitud*) cuando el gesto ocurre en la coordenada paralela al eje de rotación. Una rotación

de la cámara alrededor del eje preferido de rotación del objeto (*cambios en longitud*) cuando el gesto ocurre en la dirección perpendicular a este eje. Y finalmente cambios en el radio de esa trayectoria elíptica (*cambios de radio*), cuando el gesto exprese acercarse o alejarse al objeto.

Estos gestos del usuario serán traducidos por el sistema operativo o bien en coordenadas de píxeles en la pantalla o bien en valores adimensionales, dependiendo del tipo de dispositivo. El objetivo de esta sección es describir como se han mapeado esos valores que proporciona el sistema operativo en los tres movimientos posibles de la cámara.

Se han impuesto, además, un *par de requisitos* a la hora de desarrollar estas técnicas de interacción. El objetivo de estos requisitos es el de mejorar la usabilidad percibida por los usuarios. De tal forma que se pretende que los gestos del usuario den lugar a desplazamientos de la cámara que sean independientes de (1) la resolución de pantalla del dispositivo y (2) la distancia entre la cámara y el objeto.

Por comodidad, para el análisis se asumirá la situación en que el eje de rotación preferido es el horizontal, es decir, la trayectoria elíptica se situará en el plano XZ y el eje de rotación será el X. Mediante un simple cambio de variable se podría hacer un análisis paralelo para el caso del eje de rotación vertical.

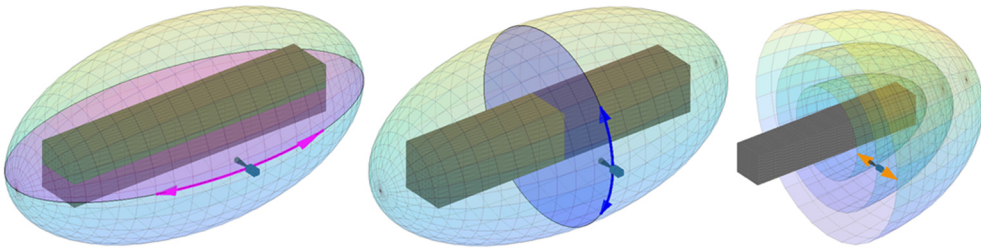


Figura 39. Dada una posición de la cámara la figura muestra los cambios posibles de su posición, para un esferoide de tipo oblongo y un objeto con eje de rotación horizontal. De izquierda a derecha, movimiento en latitud, movimiento en longitud (rotación), movimiento radial.

3.2.3.1 Cambios en latitud

Un cambio en la latitud implica un movimiento de la cámara a lo largo de la trayectoria elíptica una determinada longitud de arco, ver Figura 39. La ecuación paramétrica que define esta trayectoria elíptica es la siguiente $p = (x, z) = (r_x \cos t, r_z \sin t)$. Dada una variación en la latitud, la nueva posición de la cámara se calculará trasladando esta variación al parámetro t de la ecuación, ver expresión (27). Se puede convenir entonces que el cambio en la posición de la cámara es proporcional a la variación de latitud producida por el gesto realizado por el usuario mediante el dispositivo de interacción.

$$q = (x, z) \equiv \begin{cases} x = r_x \cos(t_0 + \Delta t) \\ z = r_z \sin(t_0 + \Delta t) \end{cases} \quad (27)$$

En objetos que tienen un eje de rotación horizontal (en los que se realizará el análisis a continuación) Δt será proporcional a los gestos horizontales del dispositivo. Por el contrario, cuando el objeto tiene un eje de rotación vertical son los gestos verticales los que son mapeados en Δt .

¿Como se obtiene entonces Δt partiendo de gestos horizontales en el dispositivo? Como se puede ver en el esquema presentado en (28). Al tratarse de gestos horizontales, estos se mapearán en variaciones expresadas en coordenadas del eje horizontal de la pantalla $\Delta \tilde{x}$, donde \tilde{x} es la coordenada X de la pantalla en píxeles. Estas variaciones se convertirán en variaciones del arco de la elipse en la posición de la cámara (Δa). Las cuales, a su vez, pueden convertirse en variaciones del parámetro t de las ecuaciones paramétricas de la elipse (Δt). De esta forma, como respuesta a un gesto del usuario la cámara se mueve de una posición p a una posición q , tal y como se muestra en la Figura 40. En el resto de este apartado se van a obtener las expresiones analíticas de este mapeo.

$$\Delta \text{ latitud} \equiv \text{Gesto horizontal del dispositivo} \rightarrow \Delta \tilde{x} \rightarrow \Delta a \rightarrow \Delta t \quad (28)$$

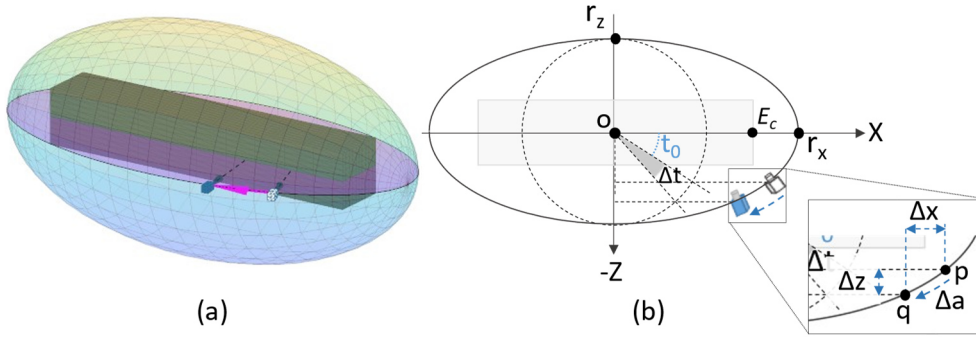


Figura 40. Ejemplo de un movimiento de la cámara en latitud para un esferoide oblongo. La cámara se mueve siguiendo una trayectoria elíptica. En (a) se muestra la situación en el espacio tridimensional mientras que en (b) la elipse sobre el plano que la contiene.

El primer paso va a consistir en hacer que las variaciones expresadas en coordenadas de la pantalla en píxeles sean independientes de resolución de la pantalla del dispositivo. Para lograr esto se van a expresar estas variaciones como un porcentaje de movimiento en la pantalla. Como se trata de variaciones horizontales, se deben tener en cuenta las dimensiones horizontales de la pantalla en píxeles, lo cual conduce a la expresión (30). Esta expresión proporciona una variación de \tilde{x} normalizada.

$$\Delta\tilde{x}_N = \frac{\Delta\tilde{x}}{\text{Screen width in pixels}} \quad (29)$$

A continuación, se establece una relación directa entre las variaciones de arco y las variaciones del gesto del dispositivo en coordenadas de pantalla, normalizados en valores. En términos más precisos, se determina que $\Delta a_N = \Delta\tilde{x}_N$. Esto implica que un desplazamiento del dispositivo a lo largo de todo el ancho de la pantalla daría como resultado una variación en el arco de la elipse igual a 1 ($\Delta a_N = 1$).

Para concluir faltaría obtener un parámetro des normalizador, que llamaremos K_φ . De esta manera se podría completar la relación (30), a

partir de la cual se obtendría la variación de arco de elipse sobre la posición de la cámara en función del gesto del dispositivo.

$$\Delta a = \Delta a_N * K_\varphi = \frac{\Delta \tilde{x}}{\text{Screen width in pixels}} * K_\varphi \quad (30)$$

El valor de este parámetro K_φ juega un papel crucial en la experiencia de uso que percibirá el usuario y, por lo tanto, no existe una solución única para él. Aunque pueda parecer que estamos retrasando su cálculo, hemos decidido posponerlo hasta más adelante en esta sección, donde se presentarán dos alternativas posibles para su determinación.

El siguiente paso es entonces, siguiendo el esquema (52), calcular la relación entre los cambios en el arco (Δa) y los cambios en el parámetro t (Δt) de las ecuaciones paramétricas de la elipse. Desafortunadamente esto no es evidente, como sí lo es en el caso de una circunferencia, ya que en una elipse este parámetro t no es un ángulo real. Sin embargo, mediante un análisis sencillo y un paso al límite se puede obtener la expresión correspondiente.

Se va a realizar el análisis para *esferoides de tipo oblongo*. La situación es la que se muestra en la Figura 40, donde suponemos un movimiento de la cámara desde un punto p a un punto q . Si se supone que las variaciones de arco (Δa) son diferenciales, es posible expresarla de forma aproximada por variaciones de x y z de la siguiente forma $\Delta a = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$. Ahora bien, estas variaciones de x y z se pueden calcular en función de los puntos inicial (p) y final (q). Para ello, se van a expresar dichos puntos usando las ecuaciones paramétricas de la elipse.

$$\begin{cases} p = (x, z) = (r_x \cos t_0, r_z \sin t_0) \\ q = (x, z) = (r_x \cos(t_0 + \Delta t), r_z \sin(t_0 + \Delta t)) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 2\pi \quad (31)$$

Las variaciones de x y z pueden calcularse ahora como las diferencias entre estos puntos. Lo que lleva a la siguiente expresión.

$$\begin{cases} \Delta x = r_x \cos t_0 - r_x \cos(t_0 + \Delta t) = r_x \cos t_0 - r_x \cos t_0 \cos \Delta t + r_x \sin t_0 \sin \Delta t \\ \Delta z = r_z \sin t_0 - r_z \sin(t_0 + \Delta t) = r_z \sin t_0 - r_z \sin t_0 \cos \Delta t - r_z \cos t_0 \sin \Delta t \end{cases} \quad (32)$$

Se ha supuesto variaciones de arco diferenciales, por lo que se puede inferir que las variaciones de t serán también diferenciales. Por tanto, se puede llevar esta última expresión al límite para obtener que.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta x, \Delta z \rightarrow \begin{cases} \Delta x = r_x \Delta t \sin t_0 \\ \Delta z = -r_z \Delta t \cos t_0 \end{cases} \quad (33)$$

Finalmente, volviendo a la expresión inicial $\Delta a = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$, se puede encontrar la relación entre Δa y Δt .

$$\Delta t = \frac{\Delta a}{\sqrt{(r_x \sin t_0)^2 + (r_z \cos t_0)^2}} \quad (34)$$

Esta ecuación (34) resuelve el problema de obtener la variación en el parámetro t de la elipse partiendo de una variación en la posición de un arco de la elipse concreto. Junto con la expresión (30) este resultado permitiría conocer la nueva posición de la cámara en respuesta a los gestos horizontal del usuario con el dispositivo. Unir estas expresiones no es aún posible, para ello falta por determinar el valor del parámetro de desnormalización de latitud.

Obtención del parámetro K_φ

- **Solución basada en el perímetro de la elipse.**

Una primera idea es hacer que K_φ sea tal que, Δa sea igual a medio perímetro de la elipse cuando el dispositivo se mueve de lado a lado de la pantalla. Es decir, hacer que $K_\varphi = \frac{1}{2} * \text{Perímetro de la elipse}$.

El cálculo del perímetro de una elipse no es, en general, un problema sencillo. Su solución exacta la proporciona la fórmula de *Gauss-Kummer* (Weisstein, s. f.), la cual es una serie infinita de difícil solución. Por suerte se dispone de la aproximación de **Ramanujan II-Cantrell** (Sykora, 2005), la cual es fácilmente calculable mediante la expresión

(35) y tiene un error máximo del 0,00145%, más que aceptable para nuestro problema.

$$\text{Perímetro} = \pi(a + b) \left[1 + \frac{3H}{10 + \sqrt{4-3H}} + \left(\frac{4}{\pi} - \frac{14}{11} \right) H^{12} \right] \quad (35)$$

donde $H = \left(\frac{a-b}{a+b} \right)^2$ y $\begin{cases} a \text{ es el semieje mayor} \\ b \text{ es el semieje menor} \end{cases}$

Se podría ahora obtener el valor desnormalizado de Δa tal que así: $\Delta a = \Delta a_N * K_\varphi$. Y mediante las expresiones (30) y (34) se llegaría a la siguiente expresión.

$$\Delta t = \frac{1}{2} * \frac{\text{Perímetro de la elipse}}{\sqrt{(r_x \sin t_0)^2 + (r_z \cos t_0)^2}} * \frac{\Delta \tilde{x}}{\text{Screen width in pixels}} \quad (36)$$

Aunque a priori esta solución parece acertada, en la práctica no tiene un funcionamiento satisfactorio para el usuario. Si bien cuando la cámara está lejos el comportamiento es correcto, falla cuando la cámara se acerca lo suficiente al objeto. Sucede que cuanto más cerca esta la cámara del objeto menor fracción de este está dentro de la visión de la cámara. Es decir, menor fragmento de la elipse de translación está dentro de la horizontal de la pantalla. Esto da lugar a que un pequeño gesto produzca un gran cambio en la parte del objeto que está siendo visualizada. Esto es así porque se ha hecho que un gesto de tamaño todo el ancho de la pantalla mueva la cámara a lo largo de la mitad del perímetro de la elipse.

Desde el punto de vista del usuario esta solución se percibe como movimientos de la cámara más rápidos cuanto más cerca del objeto se está, como se ha ilustrado en la Figura 41. Es decir, cuando los usuarios quieren tener una visión más detallada de una zona es cuando más difícil es ajustar la posición de la cámara.

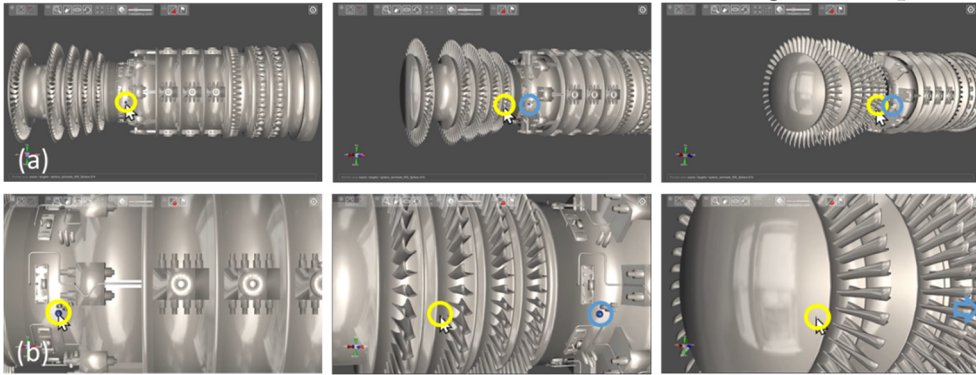


Figura 41. Detalle del funcionamiento del mapeo de los gestos del dispositivo en movimientos de traslación cuando se emplea la solución basada en el perímetro de la elipse. La posición del cursor se ha rodeado con un círculo amarillo, si este no incluye la posición del objeto esta se ha rodeada a su vez con un círculo azul. En (a) la cámara está más alejada del objeto que en (b).

- **Solución basada en la proporción del objeto en pantalla**

Con la lección aprendida, se buscó una nueva solución. En este caso el objetivo de partida era hacer que el movimiento de la cámara en traslación fuese percibido por el usuario como independiente de la distancia al objeto. Para lograr este objetivo, la idea de partida fue hacer que un gesto del dispositivo que abárquese todo el ancho de la pantalla, moviera solo el trozo de arco de elipse que se encuentra siendo visualizado en ese momento. Por consiguiente, K_{ϕ} no va a tener ahora como valor todo el perímetro de la elipse, sino solo una fracción de este. La cual será dependiente de la distancia entre el objeto y la cámara.

El efecto visual que se consigue con esta solución es que el objeto va a seguir en todo momento el gesto del dispositivo. Esto es, si el usuario pone la flecha del ratón sobre un punto del objeto e inicia un gesto de traslación, ese punto del objeto perseguirá a la flecha del ratón durante todo el gesto.

Se detallarán ahora los fundamentos de esta solución para posteriormente realizar los cálculos pertinentes. El primer punto es considerar como referencia para la interacción un elipsoide de revolución imaginario inscrito dentro de la *bounding box* del objeto. El objetivo de este elipsoide imaginario es el aproximar la forma real del objeto mediante un objeto elipsoidal promedio. Para el caso en estudio, los movimientos en latitud, es relevante el corte horizontal de este elipsoide imaginario. Este corte da lugar a la elipse imaginaria inscrita en la *bounding box*, como se puede ver en la Figura 43, en azul.

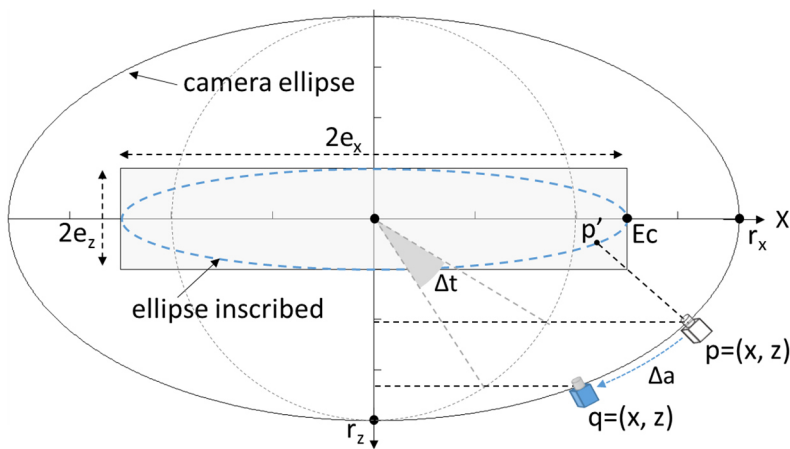


Figura 42. Primera parte del diagrama del cálculo del parámetro de desnormalización K_φ .

El siguiente punto es considerar una situación en que la cámara este lo suficientemente cerca del objeto para que solo se vea una parte de este. En la Figura 43 se ha representado, en naranja, la porción de arco de la elipse inscrita que se ve en ese momento en pantalla, esto es, que está ocupando todo el ancho de la pantalla en ese momento. Para ello se ha considerado el ángulo de la apertura horizontal de la cámara, α . Si se hace que el parámetro de desnormalización (K_φ) sea igual a este arco de la elipse inscrita se lograría que un movimiento del dispositivo de lado a lado de la pantalla coincida con el tamaño de elipse visible en pantalla.

De esta forma, se consigue que dicho elipsoide siga el gesto del dispositivo en su movimiento por la pantalla.

La limitación de la técnica es que el objeto no tiene, en general, la forma de un elipsoide de revolución. Se puede decir, por tanto, que cuanto más se acerque la forma real del objeto al elipsoide inscrito, mejor será esta aproximación. Desde el punto de vista mecánico esta solución se traduce en que cuanto más cerca estén cámara y objeto más lento se va a mover la cámara y viceversa.

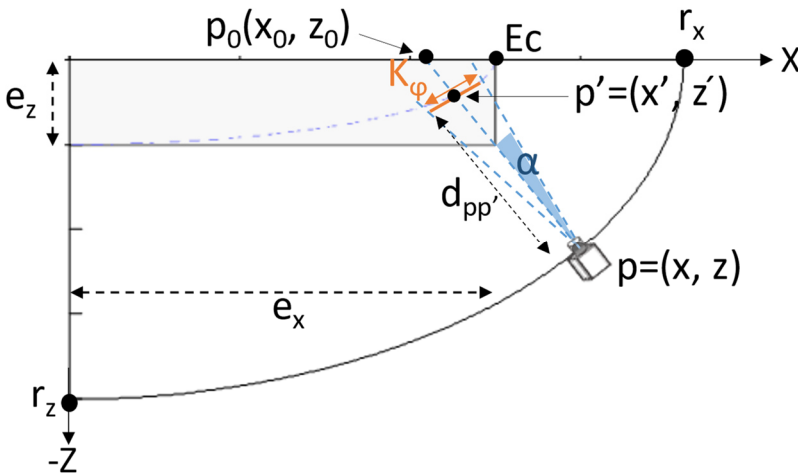


Figura 43. Segunda parte del diagrama del cálculo del parámetro de desnormalización K_φ .

A continuación, se realizará el análisis matemático para obtener el valor de K_φ siguiendo la idea presentada.

Tal y como se aprecia en la Figura 43, $p= (x, z)$ es el punto en el que se encuentra la cámara, $p'= (x', z')$ es el punto de corte entre la elipse inscrita y la perpendicular a la elipse de la cámara (se trata del punto que se vería en el centro de la pantalla) y α el ángulo de la apertura horizontal de la cámara. Se puede obtener el valor de este K_φ mediante la siguiente expresión:

$$K_{\varphi} = 2 d_{pp'}, \tan \alpha = 2 * \sqrt{(x - x')^2 + (z - z')^2} * \tan \alpha \quad (37)$$

En esta expresión todo es conocido salvo el valor del punto $p' = (x', z')$. Para encontrarlo es necesario (1) obtener la recta que pasa por el punto p y es perpendicular a la elipse de la cámara y (2) encontrar el punto de corte entre la recta anterior y la elipse inscrita en el objeto.

La ecuación de la recta perpendicular a la elipse viene dada por la expresión $z - z_0 = m_N(x - x_0)$. Donde $p = (x, z)$ es la posición actual de la cámara, $p_0 = (x_0, z_0)$ es el punto de corte con el eje X y m_N es la pendiente de esta línea perpendicular a la elipse en el punto p . El problema de obtener el punto de corte p_0 y la pendiente de la recta m_N fue resuelto en la sección 3.2.2.2, dando lugar a la expresión (10). Lo que permite llegar a la siguiente expresión, donde se han particularizado los resultados para el punto $t=t_0$.

$$z = m_{N_{t_0}} x - D \quad \text{donde} \quad \begin{cases} m_{N_{t_0}} = \frac{r_x}{r_z} \tan t_0 \\ D = (r_x^2 - r_z^2) \frac{1}{r_z} \sin t_0 \end{cases} \quad (38)$$

Para encontrar el punto de corte $p' = (x', z')$ se debe resolver el sistema formado por esta ecuación y la ecuación de la elipse inscrita en el objeto. Los semiejes de esta última estarán dados por las dimensiones de la *bounding box* del objeto, e_x y e_z .

$$\left. \begin{array}{l} \frac{x^2}{e_x^2} + \frac{z^2}{e_z^2} = 1 \\ z = m_{N_{t_0}} x - D \end{array} \right\} \rightarrow \frac{x^2}{e_x^2} + \frac{m_{N_{t_0}}^2 \cdot x^2 + D^2 - 2m_{N_{t_0}} \cdot D \cdot x}{e_z^2} = 1 \quad (39)$$

La solución de este sistema, (39), proporciona finalmente el valor de las coordenadas del punto $p' = (x', z')$, expresión (40). Esta solución permite volver a la expresión (37) y obtener finalmente el valor del factor de desnormalización K_{φ} .

$$p' = \begin{cases} x' = \frac{e_x^2 \cdot m_{N_{t_0}} \cdot D \pm e_z \cdot e_x \sqrt{e_z^2 - D^2 + e_x^2 \cdot m_{N_{t_0}}^2}}{[e_z^2 + e_x^2 \cdot m_{N_{t_0}}^2]} \\ z' = \pm e_z \sqrt{1 - \frac{x^2}{e_x^2}} \end{cases} \quad (40)$$

Una vez que hemos determinado un valor para K_φ , estamos en condiciones de resolver integralmente el problema, complementando las expresiones previamente definidas. De la ecuación (30) se deriva el valor no normalizado $\Delta a = \Delta a_N * K_\varphi$. Además, el resultado obtenido en la expresión (34) se particulariza ahora en la elipse inscrita. Con todos estos resultados a nuestro alcance, podemos finalmente deducir la ecuación (41), que establece la relación entre el movimiento de la cámara y las variaciones horizontales en la pantalla del dispositivo.

$$\Delta t = \sqrt{\frac{(x - x')^2 + (z - z')^2}{(e_x \sin t_0)^2 + (e_z \cos t_0)^2}} * \frac{2 \tan \alpha}{SW \text{ in pixels}} * \Delta \tilde{x} \quad (41)$$

donde x' y z' vienen dados por la expresión (40)

Tras distintas pruebas con sujetos este resultado parece tener un comportamiento mucho más natural y satisfactorio desde el punto de vista de la usabilidad. El objeto tiende a perseguir el gesto del usuario en la pantalla, sin importar la distancia a la que la cámara se encuentre del mismo. Sí que es cierto, sin embargo, que cuando menos se parezca el objeto a un esferoide menos válida es la aproximación empleada. Aun así, esta solución parece arrojar unos resultados suficientemente buenos sin importar la forma del objeto. Queda pendiente, por ahora, la realización de un experimento formal con sujetos que validen esta técnica de mapeo en comparación con otras.

La Figura 44 ilustra el comportamiento de la solución adoptada en cuatro situaciones distintas. En cada caso se selecciona una pequeña zona del objeto (esfera azul) y se arrastra el ratón hacia la derecha de la pantalla. Se puede observar como las posiciones más centradas al objeto

(a y b) tiene mejor comportamiento que las laterales (c y d). Esto se debe a que en los extremos es cuando más difieren la forma del objeto y la del esferoide inscrito. También se observa que cuando más cerca del objeto está la cámara (b y d) mejor comportamiento tiene la aproximación empleada. Esto es así porque cuando más se acerca la cámara más se aproxima la forma del esferoide al objeto, a una distancia suficiente la navegación se convertirá en esférica.

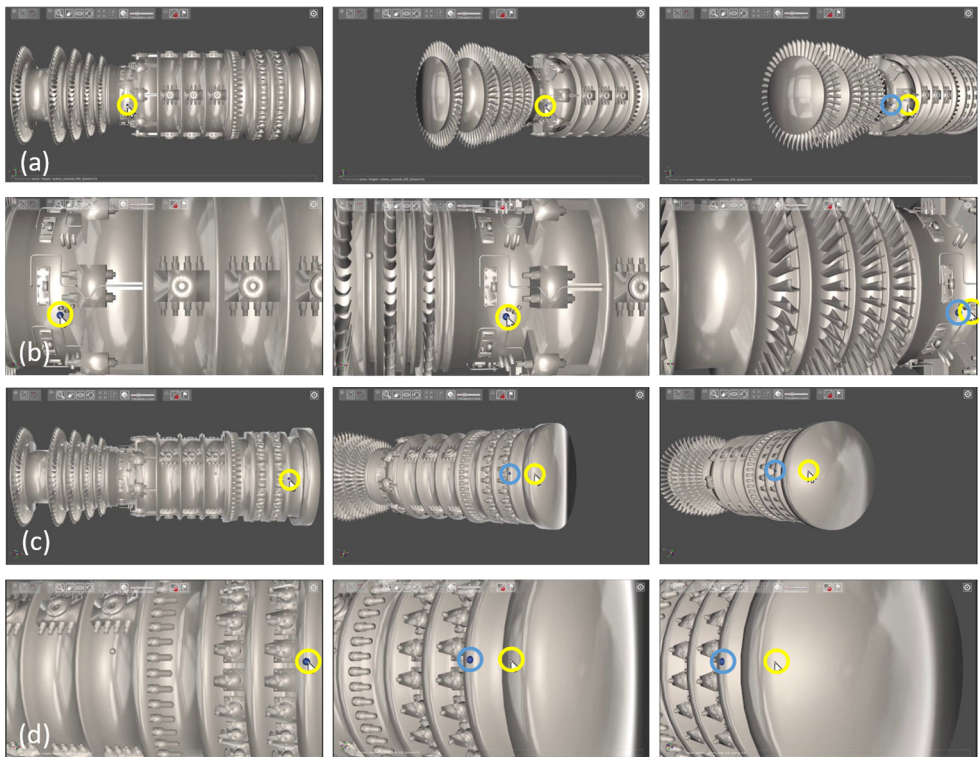


Figura 44. Ejemplo del funcionamiento del mecanismo de mapeo durante movimientos en latitud para un objeto oblongo. La posición del cursor se ha rodeado con un círculo amarillo, si este no incluye la posición del objeto esta se ha rodeado a su vez con un círculo azul. En (a) y (b) se ha seleccionado una posición del objeto centrada, mientras que en (c) y (d) una posición lateral. En (a) y (c) la cámara está más alejada del objeto que en (b) y (d).

Este análisis es igualmente aplicable a *esferoides de tipo oblatos*; la única diferencia radica en la sustitución de los semiejes de las elipses,

reemplazando z por x , tanto para la elipse inscrita como para la referente a la cámara. A continuación, se presentan todas las expresiones de manera resumida, ahora diseñadas para ser válidas en ambos tipos de esferoides, con un eje de rotación horizontal.

$$\Delta t = \sqrt{\frac{(x - x')^2 + (z - z')^2}{(a_{ei} \sin t_0)^2 + (b_{ei} \cos t_0)^2}} * \frac{2 \tan \alpha}{SW \text{ in pixels}} * \Delta \tilde{x}$$

donde (42)

- La elipse inscrita es: $\begin{cases} a_{ei} = \max[e_x, e_z] \\ b_{ei} = \min[e_x, e_z] \end{cases}$
- El punto de corte entre la elipse inscrita y la \perp a la elipse de traslación de la cámara:

$$p' = \begin{cases} x' = \frac{a_{ei}^2 \cdot m_{N_{t_0}} \cdot D \pm a_{ei} \cdot b_{ei} \sqrt{b_{ei}^2 - D^2 + a_{ei}^2 \cdot m_{N_{t_0}}^2}}{[b_{ei}^2 + a_{ei}^2 \cdot m_{N_{t_0}}^2]} \\ z' = \pm b_{ei} \sqrt{1 - \frac{x'^2}{a_{ei}^2}} \end{cases}$$

donde

- La pendiente de la \perp a la elipse de traslación de la cámara:

$$\begin{cases} m_{N_{t_0}} = \frac{a_T}{b_T} \tan t_0 \\ D = (a_T^2 - b_T^2) \frac{1}{b_T} \sin t_0 \end{cases}$$

- La elipse de traslación de la cámara es:

$$\begin{cases} a_T = \max[r_x, r_z] \\ \quad \quad \quad \square \\ b_T = \min[r_x, r_z] \end{cases}$$

Se podría realizar ahora un análisis paralelo para los objetos que tienen como su *eje de rotación preferido el vertical*. En ese caso, la diferencia principal es que la elipse de la trayectoria estaría en el plano

YZ. Esto implica considerar las variaciones verticales del dispositivo, es decir, en el eje Y de la pantalla, así como las dimensiones del objeto en ese plano. Además, ahora se tiene en cuenta el ángulo vertical del campo de visión de la cámara, al que se llamará β , en vez del horizontal. Tras el desarrollo correspondiente se llegará a la expresión (43).

$$\Delta t = \sqrt{\frac{(y - y')^2 + (z - z')^2}{(a_{ei} \sin t_0)^2 + (b_{ei} \cos t_0)^2}} * \frac{2 \tan \beta}{SH \text{ in pixels}} * \Delta \tilde{y}$$

donde

- La elipse inscrita es: $\begin{cases} a_{ei} = \max[e_y, e_z] \\ b_{ei} = \min[e_y, e_z] \end{cases}$
- El punto de corte entre la elipse inscrita y la \perp a la elipse de traslación de la cámara:

$$p' = \begin{cases} y' = \frac{a_{ei}^2 \cdot m_{N_{t_0}} \cdot D \pm a_{ei} \cdot b_{ei} \sqrt{b_{ei}^2 - D^2 + a_{ei}^2 \cdot m_{N_{t_0}}^2}}{[b_{ei}^2 + a_{ei}^2 \cdot m_{N_{t_0}}^2]} \\ z' = \pm b_{ei} \sqrt{1 - \frac{y'^2}{a_{ei}^2}} \end{cases} \quad (43)$$

donde

- La pendiente de la \perp a la elipse de traslación de la cámara:

$$\begin{cases} m_{N_{t_0}} = \frac{a_T}{b_T} \tan t_0 \\ D = (a_T^2 - b_T^2) \frac{1}{b_T} \sin t_0 \end{cases}$$

- La elipse de traslación de la cámara es:

$$\begin{cases} a_T = \max[r_y, r_z] \\ \quad \quad \quad \square \\ b_T = \min[r_y, r_z] \end{cases}$$

3.2.3.2 Cambios en longitud

Un cambio en la longitud da como resultado una rotación de la cámara alrededor del eje de rotación del objeto, dibujo central de la Figura 39. Dada entonces una variación de longitud, se debe calcular la nueva posición de la cámara rotando el plano que contiene la elipse de translación con respecto al eje de rotación.

El cambio de posición de la cámara debe ser entonces proporcional a la variación de longitud ($\Delta\theta$) producida por el gesto del usuario mediante el dispositivo de interacción. En los objetos con eje de rotación horizontal, $\Delta\theta$ será proporcional a los gestos verticales del dispositivo. Por el contrario, en los objetos con eje vertical serán los gestos horizontales los mapeados en $\Delta\theta$. El análisis a continuación se realizará, de nuevo, para objetos con eje de rotación horizontal.

¿Cómo se puede obtener $\Delta\theta$ partiendo de los gestos verticales del dispositivo? El esquema se puede ver en la expresión (44) y es similar al presentado para los movimientos en latitud. Los gestos verticales del dispositivo son mapeados en variaciones verticales expresadas en coordenadas del eje vertical de la pantalla $\Delta\tilde{y}$, donde \tilde{y} es la coordenada Y de la pantalla expresada en píxeles. Estas variaciones van a ser a su vez mapeadas en variaciones de un arco de circunferencia sobre la posición de la cámara (Δa). Y estas últimas son trasladadas a variaciones del ángulo de rotación ($\Delta\theta$) del plano de la cámara, o lo que es lo mismo, del plano que contiene la elipse. Este nuevo valor del ángulo, $\theta' = \theta_0 + \Delta\theta$, determinará la nueva posición de la cámara (q), tal y como muestra la Figura 45. En el resto de este apartado se van a buscar las expresiones analíticas de este mapeo.

$$\Delta \text{ longitud} \equiv \text{Gesto vertical del dispositivo} \rightarrow \Delta\tilde{y} \rightarrow \Delta a \rightarrow \Delta\theta \quad (44)$$

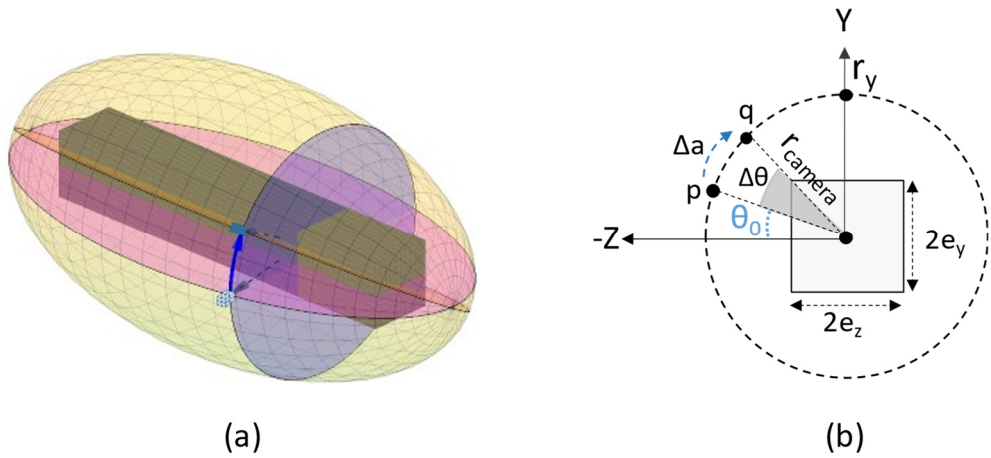


Figura 45. Ejemplo de movimiento de la cámara en longitud para un esferoide oblongo y eje de rotación horizontal. La cámara rota alrededor del eje de rotación, describiendo una trayectoria circular. En (a) se muestra la situación en el espacio tridimensional mientras que en (b) la proyección en el plano YZ.

El primer paso es hacer que estas variaciones sean independientes de la resolución de la pantalla del dispositivo. Para ello, los cambios de longitud se expresarán como una proporción del movimiento en la pantalla. En este caso, la dimensión relevante de la pantalla es la vertical, ya que los gestos del dispositivo se mapean en una variación vertical en la pantalla. Se deduce entonces la expresión (46), la cual nos proporciona una variación \tilde{y} normalizada.

$$\Delta\tilde{y}_N = \frac{\Delta\tilde{y}}{\text{Screen height in pixels}} \quad (45)$$

A continuación, se procede a establecer de nuevo una correspondencia directa entre las variaciones de arco de rotación y las variaciones del gesto del dispositivo normalizadas, de tal forma que se hace que $\Delta a_N = \Delta\tilde{y}_N$. Esto supone que un gesto del dispositivo que abarque todo el alto de la pantalla dará como resultado una variación del arco de la circunferencia de rotación igual a 1.

En este punto es necesario obtener un parámetro de desnormalización, denominado K_λ , que permita ajustar el valor del arco. Eso conduce a la expresión (46), la cual posibilita calcular la variación en el arco de rotación de la cámara, en función del gesto realizado en el dispositivo.

$$\Delta a = \Delta a_N * K_\lambda = \frac{\Delta \tilde{y}}{\text{Screen height in pixels}} * K_\lambda \quad (46)$$

Al igual que antes, el valor de K_λ va a jugar un papel decisivo en la experiencia del usuario. Será necesario establecer un criterio objetivo para solucionarlo, solución que no será única y tendrá ventajas e inconvenientes. En esta sección se van a obtener dos soluciones posibles, partiendo de dos criterios distintos.

Antes de abordar ese problema, vamos a resolver el último paso que queda para completar el esquema presentado en (44), es decir, obtener la relación entre los cambios en el arco y los cambios en el ángulo de rotación. La trayectoria de rotación es una circunferencia y, por lo tanto, la solución buscada se basa en la expresión del arco de esta circunferencia. Para encontrar esta solución, es entonces necesario conocer el radio de dicha circunferencia. El valor de este radio varía en función de la posición de la cámara en la elipse de traslación en cada instante. Se puede calcular a partir de las ecuaciones paramétricas de la elipse y del valor del parámetro t en ese momento específico. De esta manera, se obtiene la expresión (47).

$$\Delta \theta = \frac{\Delta a}{r_{camera}} = \frac{\Delta a}{|r_z \cdot \text{sen}(t)|} \quad (47)$$

Esta expresión (47) resuelve, junto al expresión XX, el problema de calcular la nueva posición de la cámara tras un gesto de rotación realizado en el dispositivo. En concreto, esta solución es válida para el caso el caso de eje de rotación horizontal, como el representado en la Figura 45. Sin embargo, para solucionar el problema aún debemos determinar el valor del parámetro de desnormalización XX.

Obtención del parámetro K_λ

- **Solución basada en el perímetro de la circunferencia.**

Una primera solución, al menos la primera que nos planteamos nosotros, es usar el perímetro de la trayectoria seguida por la cámara para obtener este parámetro des normalizador, al igual que se hizo en el caso de los cambios de latitud. De tal forma que un arrastre del cursor que abarque toda la altura de la pantalla correspondería a una rotación de media circunferencia de rotación: es decir hacer $K_\lambda = \frac{1}{2} * \text{Perímetro}$.

Obtener el perímetro de una circunferencia es inmediato ($2\pi * r_{camera}$) y junto a las expresiones (46) y (47) llevaría a la siguiente solución al problema completo.

$$\Delta\theta = \frac{1}{r_{camera}} * \frac{\Delta\tilde{y} * \pi * r_{camera}}{\text{Screen height in pixels}} = \frac{\pi \cdot \Delta\tilde{y}}{\text{Screen height in pixels}} \quad (48)$$

Al igual que antes en la práctica esta solución resulta ser poco adecuada desde el punto de vista de la usabilidad. Cuando la cámara está lejos del objeto esta solución funciona satisfactoriamente, sin embargo, el comportamiento se degrada cuanto se acerca al objeto. Esto se debe a que cuanto más cerca se está del objeto menos porción de este está dentro del campo de visión de la cámara, o lo que es lo mismo, menor porción de la circunferencia de rotación es visible. Esto tiene como consecuencia que un pequeño gesto del dispositivo cause un gran cambio en la zona del objeto que está siendo visualizada por el usuario. Que percibe una aceleración en los movimientos al acercarse al objeto y viceversa.

En la Figura 46 se ilustra este efecto, se puede observar que para el caso b ante un gesto del dispositivo del mismo tamaño la rotación se produce una mayor velocidad, tanto que la parte del objeto apuntada llega a desaparecer de la pantalla.

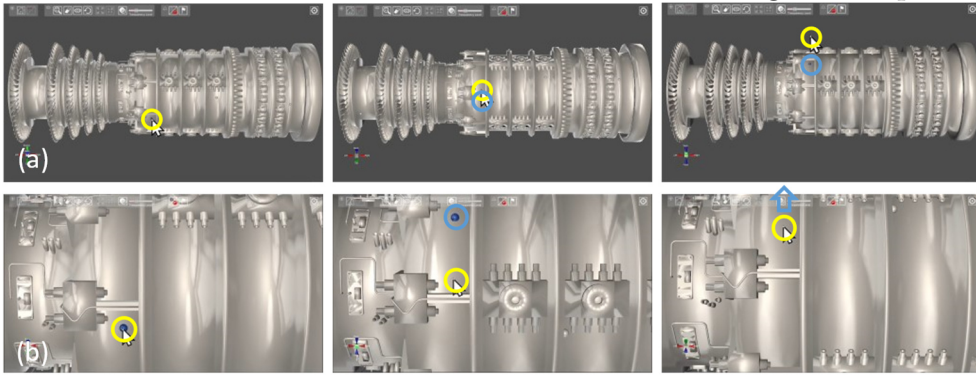


Figura 46. Ilustración del mapeo de los gestos del dispositivo en movimientos de rotación, longitudinales, cuando se emplea la solución basada en el perímetro de la circunferencia. La posición del cursor se ha rodeado con un círculo amarillo, si este no incluye la posición del objeto esta se ha rodeada a su vez con un círculo azul. En (a) la cámara está más alejada del objeto que en (c).

- **Solución basada en la proporción del objeto en pantalla**

Esta solución busca resolver los fallos en usabilidad detectados y es equivalente a la que se adoptó en el caso de los movimientos en latitud. El objetivo es hacer que el movimiento de la cámara (en la rotación) sea percibido por el usuario como independiente de la distancia al objeto.

La solución se basa en lograr que: un gesto vertical del dispositivo que abarque todo el alto de la pantalla mueva la cámara, a lo largo de la circunferencia de rotación, solo el trozo correspondiente a la parte de esta que se encuentra en ese momento en pantalla. En otras palabras, el valor de K_λ será ahora una fracción del perímetro de la elipse, que es dependiente de la distancia entre el objeto y la cámara. El efecto visual que se consigue es que el objeto tiende a seguir en todo momento el gesto vertical del dispositivo por la pantalla.

En la búsqueda de esta solución se continúa considerando como una aproximación del objeto al elipsoide de revolución imaginario inscrito dentro de la *bounding box* de este. Ahora, sin embargo, al estar

estudiando los movimientos de rotación es relevante el corte de este elipsoide imaginario con el plano vertical. Este corte da lugar a una circunferencia virtual inscrita en plano YZ, en azul en la Figura 48.

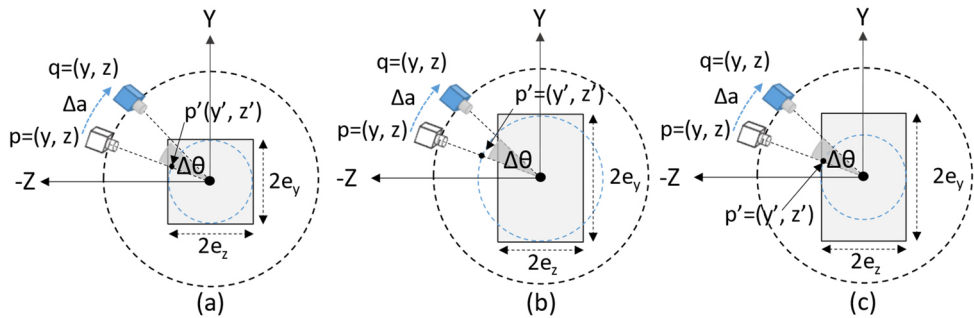


Figura 47. Diferentes opciones para seleccionar la circunferencia inscrita según el perfil del objeto.

Sucedan aquí diferentes situaciones, según el perfil del objeto en este plano. Si el perfil es cuadrado ($e_y = e_z$) no hay problema, se selecciona este valor como radio de la elipse inscrita, como ilustra la Figura 47a. Sin embargo, si este perfil es alargado ($e_y \neq e_z$) se debe decidir qué valor emplear. Eligiendo el mayor de ellos ocurrirá que la circunferencia no quedará completamente inscrita dentro del objeto, se saldrá por algunas partes, como se ha ilustrado en la Figura 47b. Sin embargo, si se elige el menor valor la circunferencia inscrita quedará dentro del objeto en parte del objeto, ver Figura 47c. El primer caso tendrá como consecuencia que la interacción será un poco más lenta que en el segundo caso, al hacer mayor el radio de esta elipse “pseudo” inscrita. Tras realizar distintas pruebas se decidió elegir el valor mayor, ya que esta opción daba mejores resultados, con una velocidad de giro más ajustada a la del dispositivo. Resumiendo, se define esta circunferencia inscrita como la que tiene de radio la mayor dimensión de la *bounding box* del objeto en el plano de rotación, en el caso de eje de rotación horizontal, $r_{circunferencia_inscrita} = \max[e_y, e_z]$.

La siguiente consideración para resolver este problema es suponer la situación en que la cámara está lo suficientemente cerca del objeto para que solo una parte de este sea visible en la vertical de la pantalla. Esta situación se pretende ilustrar en la Figura 48, donde se muestra en naranja la porción de arco de circunferencia que está dentro de la vertical de la pantalla, siendo β el ángulo de apertura vertical de la cámara. Si se hace que K_λ coincida con la longitud de este arco de la circunferencia inscrita se lograría el efecto deseado.

Al igual que antes, la principal limitación de esta técnica es que en general los objetos no tienen forma de elipsoide de revolución, para el problema que nos atañe, no tienen un perfil circular en el plano de rotación. Se puede decir entonces que cuanto más se acerque el perfil del objeto en el plano YZ a una circunferencia mejor será esta aproximación. En este caso ocurre además que la circunferencia virtual podrá estar o no completamente inscrita la *bounding box* del objeto. Esto va a provocar un desajuste mayor en la interacción cuando los objetos tengan una sección alargada en el plano de rotación. Este problema era previsible, puesto que es intrínseco al uso de esferoides.

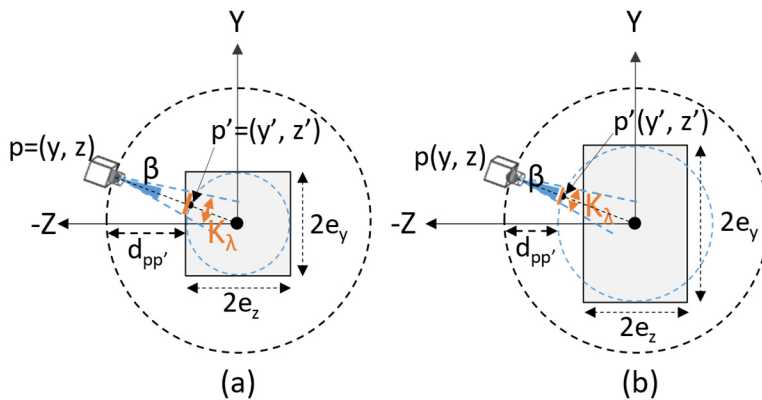


Figura 48. Diagrama de la solución propuesta para encontrar el valor de parámetro K_λ .

Dadas todas estas suposiciones se puede ahora obtener el valor propuesto para K_λ . Como se puede ver en la Figura 48 se va a suponer que la cámara se encuentra situada en el punto $p = (y, z)$; $p' = (y', z')$ es el punto de corte entre la perpendicular a la circunferencia de la cámara y la circunferencia inscrita en el objeto y β el ángulo de apertura vertical de la cámara. Este esquema permite obtener el valor del parámetro K_λ a través de la tangente de β y la distancia entre los dos puntos mencionados. En este caso el cálculo de esta distancia es inmediata, se trata solo de la diferencia entre los radios de las circunferencias. Se obtiene entonces la siguiente expresión:

$$K_\lambda = 2 d_{pp'} \operatorname{tag} \beta = 2 (r_{camera} - \max[e_y, e_z]) * \operatorname{tag} \beta = 2 (|r_z \cdot \operatorname{sen}(t)| - \max[e_y, e_z]) * \operatorname{tag} \beta \quad (49)$$

Una vez obtenido un valor para K_λ es posible dar la solución al problema completo, unificando las expresiones previamente calculadas. De la expresión (46) se obtiene el valor no normalizado de cambio en el arco, $\Delta a = \Delta a_N * K_\lambda$. Con la expresión (47) se tiene la relación entre el cambio en el ángulo de rotación de la cámara en función del cambio en el arco, ahora esta expresión se particulariza en la circunferencia inscrita, de tal forma que $\Delta \theta = \frac{\Delta a}{\max[e_y, e_z]}$. Con todos estos resultados es posible obtener la expresión siguiente, (50), que relaciona los gestos verticales del dispositivo en la pantalla con el movimiento de rotación de la cámara para objetos con eje de rotación horizontal. Todo este análisis sería válido también para esferoides oblatos, por lo que esta expresión es válida tanto para *esferoides oblongos* como *oblatos*.

$$\Delta \theta = \frac{|r_z \cdot \operatorname{sen}(t)| - \max[e_y, e_z]}{\max[e_y, e_z]} * \frac{2 \operatorname{tag} \beta}{\text{Screen height in pixels}} * \Delta \tilde{y} \quad (50)$$

con $t \in [0, 2\pi]$

La Figura 49 ilustra mediante capturas el funcionamiento de esta solución. Se puede observar como en las dos situaciones mostradas, en las que la distancia del objeto a la cámara es muy diferente, la cantidad

de rotación aplicada es muy similar y proporcional a tamaño del gesto del dispositivo.

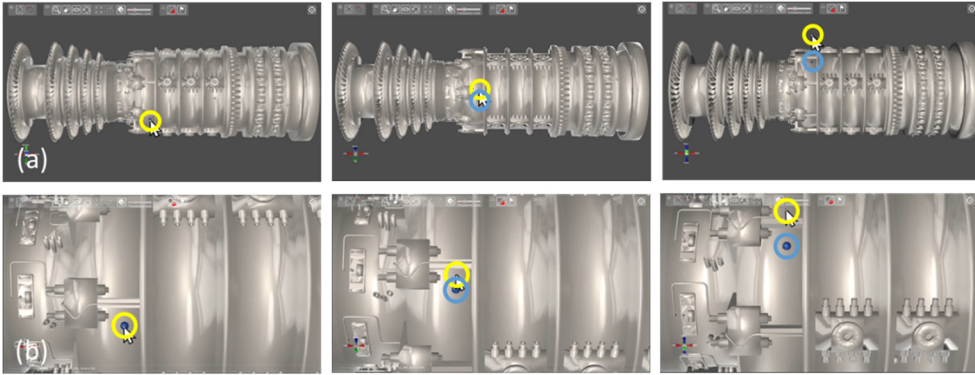


Figura 49. Ilustración del mapeo de los gestos del dispositivo en movimientos de rotación, longitudinales, cuando se emplea la solución basada en la distancia del objeto a la cámara. La posición del cursor se ha rodeado con un círculo amarillo, si este no incluye la posición del objeto esta se ha rodeada a su vez con un círculo azul. En (a) la cámara está más alejada del objeto que en (c).

Se puede hacer ahora un análisis paralelo para *objetos con eje de rotación vertical*. En ese caso, la elipse de translación se encontraría en el plano vertical (YZ) y la circunferencia virtual sobre la que se efectúan los movimientos de rotación, así como la circunferencia inscrita, en el plano horizontal (XZ). Eso implica que serían las variaciones horizontales del dispositivo las que se deberían considerar, además del ángulo horizontal de la apertura de la cámara. El desarrollo correspondiente da lugar a la expresión (51).

$$\Delta\theta = \frac{|r_z \cdot \text{sen}(t)| - \max[e_x, e_z]}{\max[e_x, e_z]} * \frac{2 \text{tag } \alpha}{\text{Screen width in pixels}} * \Delta\tilde{x} \quad (51)$$

con $t \in [0, 2\pi]$

3.2.3.3 Cambios en el radio

Un movimiento radial de la cámara implica alejar o acercar la cámara al objeto 3D, aumentar o disminuir el *zoom* de la cámara sería otra forma de verlo. En nuestro modelo esto se resuelve con un aumento o disminución de los semiejes del elipsoide. Por tanto, cada cambio en la posición radial de la cámara implica que hay que calcular un nuevo elipsoide virtual, por tanto, una nueva elipse de translación para la cámara.

Para resolver el problema se toma una primera decisión de diseño. Dado un gesto del dispositivo que implique un movimiento radial de una cantidad Δr , este se va a mapear en un cambio del valor del semieje de la elipse que se encuentre en el eje Z. El valor del otro semieje de la elipse se determinará mediante las relaciones presentadas en las secciones previas. Entonces, para esferoides de tipo oblongo los movimientos radiales se convierten en cambios del valor del semieje menor de la elipse ($b = r_z$), y el nuevo valor del semieje mayor se calculará mediante la expresión (20). Para el caso de los esferoides oblatos, los movimientos radiales se mapean en cambios del semieje mayor ($a = r_z$), y el nuevo semieje menor se obtiene con la relación (23). En la Figura 50 se ha representado el proceso para ambos casos.

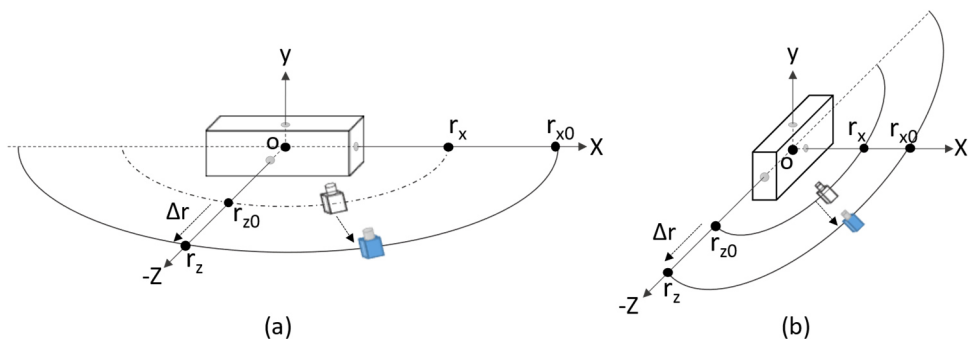


Figura 50. Ejemplo de movimientos radiales con eje de rotación horizontal, (a) esferoide oblongo y (b) un esferoide oblató.

Es interesante observar qué ocurre en estas expresiones (20) y (23) cuanto más se aleja la cámara del objeto 3D. Este análisis consiste en llevar estas expresiones al límite, buscando estudiar su comportamiento cuando el semieje correspondiente se hace mucho mayor que el tamaño del objeto, representado por su *bounding box*. Se llega a la conclusión que los valores de los semiejes en el límite tienden a hacerse iguales. Se puede ver este estudio en las expresiones (52) para el caso oblongo y (53) para el caso oblató.

$$\begin{aligned} \text{Si } r_z \gg e_x \rightarrow r_x &= \lim_{r_z \rightarrow \infty} \frac{1}{2} (e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_z^2}) \\ &= \lim_{r_z \rightarrow \infty} \frac{1}{2} (e_x + 2r_z) = r_z \end{aligned} \quad (52)$$

$$\text{Si } r_z \gg e_z \rightarrow r_x = \lim_{r_z \rightarrow \infty} \sqrt{r_z^2 - r_z e_{y/z}} = \lim_{r_z \rightarrow \infty} \sqrt{r_z^2} = r_z \quad (53)$$

Este resultado es importante, puesto que nos dice que cuando la cámara se va alejando del objeto la elipse de translación de la cámara se va convirtiendo en una circunferencia. Es decir, nuestro elipsoide de navegación se convierte en una esfera según se aleja la cámara del objeto.

De hecho, se podría ver al revés, cuando la cámara se encuentra lejos del objeto se está utilizando una navegación de tipo esférico, un clásico *virtual track-ball*, y a medida que se acerca al objeto se transforma en una navegación de tipo elipsoidal. Así, el sistema de navegación es capaz de ajustarse a la geometría del objeto conforme más se acerca, para poder llegar a todas sus partes de una forma más usable.

La Figura 51 muestra gráficamente este efecto. Se muestra un objeto de planta rectangular cuyas dimensiones tiene una relación de 6 a 1; su tamaño es seis veces mayor en el eje X que en el eje Z. Se puede observar como la elipse de navegación se adapta al objeto, haciéndose cada vez más aplanada, conforme se acerca.

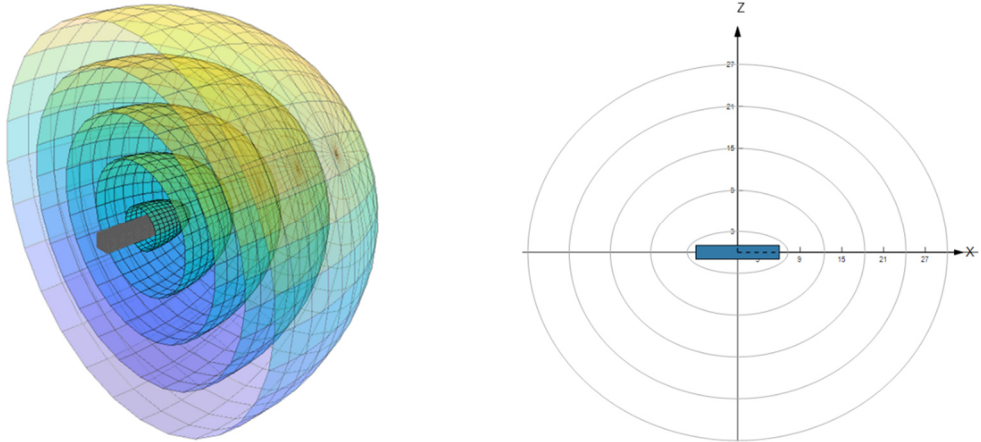


Figura 51. Efecto que la distancia entre la cámara y el objeto tiene sobre la forma del elipsoide que define las posiciones de la cámara, para un objeto con relación 6:1 en sus dimensiones y con eje de rotación horizontal. A la izquierda se muestra la situación tridimensional, a la derecha las elipses sobre el plano XZ.

¿Cómo se obtiene el valor de los cambios radiales partiendo de los gestos del dispositivo?

Aún queda por resolver cómo se realiza la conversión de los gestos del dispositivo en cambios en los semiejes de la elipse. Para resolver este problema primero se debe profundizar un poco en el problema de las unidades y la escala en el mundo virtual.

El mundo virtual plantea intrínsecamente un problema de escala. Esto es, no tiene por qué haber una relación entre la escala de los objetos virtuales y las unidades de referencia del sistema, especialmente en un sistema en el que el objeto 3D flota solo en el espacio. Para ilustrar esta idea, si un vehículo 3D se imagina con sus dimensiones físicas reales, sean las que sean, en un mundo virtual puede representarse con cualesquiera otras unidades siempre que se mantengan las proporciones. Si hubiese más de un objeto en la escena, bastaría de nuevo con mantener la proporción entre ellos. Colocando la cámara a la distancia adecuada, es imposible que el usuario distinga entre una escala y otra.

Esto da lugar a una gran variabilidad en la distancia que debe recorrer la cámara entre su posición actual y la distancia mínima posible¹. Puede haber diferencias de varios órdenes de magnitud entre situaciones distintas, que, sin embargo, son visualmente idénticas para los usuarios. Sin embargo, se desea una situación en la que la experiencia de interacción sea siempre la misma, independientemente de toda esta variabilidad. Es decir, que un mismo gesto haga variar la distancia entre la cámara y el objeto en igual medida, independientemente de la escala de este. La solución pasa por añadir un factor para el mapeo de estos movimientos radiales que haga las variaciones relativas, pero ¿relativas a qué?

Para responder a esta última pregunta es necesario hacer una distinción entre dos tipos de dispositivos debido a la gran diferencia conceptual entre ellos. Existen dispositivos en los que la interacción y la visualización funcionan conjuntamente, una pantalla táctil, y aquellos en los que esto no ocurre, un ratón, por ejemplo. Los primeros diremos que están *co-ubicados* y los segundos que están *no co-ubicados*.²

Dispositivos *no co-ubicados*

Ejemplos de este tipo de dispositivos son el ratón o el touchpad. En ellos el zoom se acciona con la rueda del ratón o con un gesto del dedo, pero sin "tocar" directamente el objeto virtual. La estrategia que se va a seguir para estos dispositivos consiste en hacer que las variaciones de la posición radial sea relativa a la distancia máxima que se puede recorrer inicialmente. Es decir, un gesto del dispositivo modificará la distancia de la cámara al objeto un porcentaje de la distancia total a recorrer inicialmente.

¹ Suponiendo que la distancia mínima es aquella en la cual la cámara colisionaría con el objeto.

² En inglés se emplea normalmente el término *co-located* y *non co-located*.

En la Figura 52 se muestra un esquema de la situación. La posición inicial de la cámara es tal que el objeto se ajusta completamente a la pantalla, mostrándose en su totalidad. Por otro lado, la distancia más cercana a la que la cámara puede estar del objeto viene determinada por la elipse mínima, más cerca la cámara colisionaría con el objeto (ver apartado 3.2.3.4). La distancia máxima que puede recorrer la cámara (Δd_{max}) se puede calcular entonces como la diferencia entre la posición inicial y la posición más cercana posible. Su valor vendría dado entonces por esta sencilla expresión.

$$\Delta d_{max} = Z_0 - r_{z\ min} \tag{54}$$

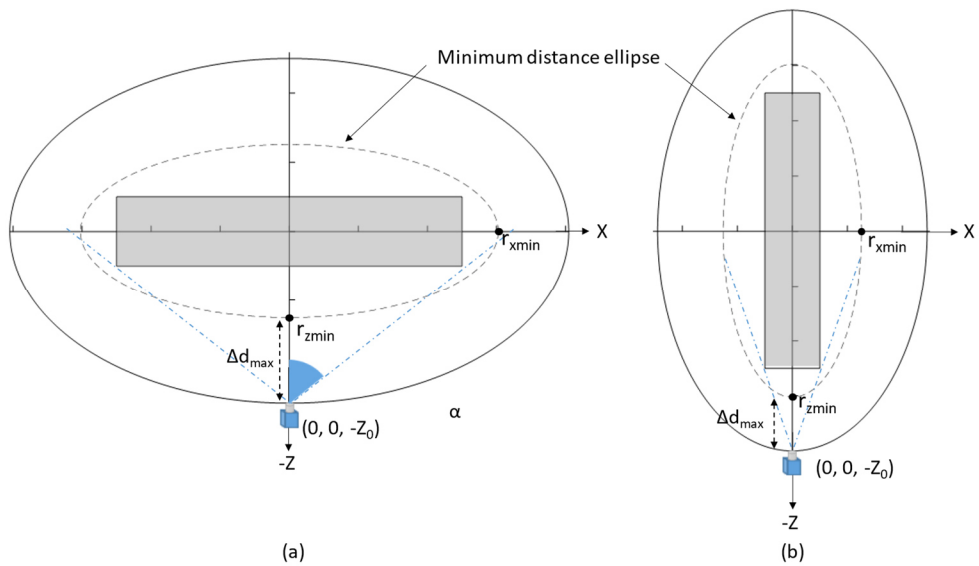


Figura 52. Esquema de mapeo de los movimientos radiales para dispositivos *non co-located*. Tanto para los esferoides (a) oblongos como para los (b) oblatos.

Finalmente, la expresión (55) regirá los movimientos radiales para los dispositivos no-colocados. Donde Δr representa la variación producida por el gesto en el dispositivo y Δd es la variación que se mapea en el valor del semieje de la elipse correspondiente al eje z. La expresión incluye un factor de escala que permite ajustar la interacción a los deseos del diseñador o del usuario. Si $K_{scale} = 1$, una variación de una unidad

de Δr implica una variación del uno por ciento de la distancia inicial. Este factor permite cumplir con el principio de diseño de C/D (*control-a-display ratio*) propuesto por (Bade et al., 2005a), con el propósito de mejorar la usabilidad¹.

$$\Delta d = \frac{\Delta d_{max}}{100} * K_{scale} * \Delta r \quad \text{donde } \Delta d = \Delta r_z \quad (55)$$

Dispositivos co-ubicados

Un ejemplo de este tipo de dispositivos es una pantalla táctil. En la misma el usuario puede tener la sensación de tocar el objeto y hacer un gesto para cambiar su tamaño. Es muy normal hoy en día poner el objeto entre los dedos y hacer un gesto de *pellizco* (*pinching*) para cambiar su tamaño. En ese caso, lo ideal es que el tamaño del objeto siga a los dedos del usuario en todo momento.

En consecuencia, el enfoque aquí se basa en la siguiente idea: si el usuario toma el objeto entre sus dedos, los bordes del objeto deben acompañarlos cuando se juntan o se separan. Dicho de otra forma, el cambio porcentual de distancia entre los dedos se debe mapear, de forma inversamente proporcional, en el cambio porcentual de la distancia de la cámara al objeto 3D. Esto lleva a la siguiente expresión:

$$\Delta d = d_{current\ camera\ position} * \left(1 - \frac{d_{current\ fingers\ position}}{d_{previous\ fingers\ position}} \right) \quad (56)$$

$$\text{donde } \Delta d = \Delta r_z$$

¹ En la implementación realizada en esta tesis se ajustó un $K_{scale} = 5$. Esto es, cada variación unitaria implica un movimiento de la cámara en la dirección radial equivalente a un 5% de la distancia inicial. Este valor se ajustó tras diversas pruebas con sujetos, buscando un equilibrio entre velocidad del movimiento y capacidad de ajuste.

3.2.3.4 Cálculo del elipsoide mínimo

El elipsoide virtual mínimo, será el más pequeño que envuelve al objeto 3D sin que la cámara colisione con el mismo. En definitiva, todo lo que la cámara puede acercarse al objeto, suponiendo que no se permiten colisiones. Para encontrar este elipsoide virtual mínimo se va a tener en cuenta que los elipsoides que se están empleando son de revolución, lo cual simplifica en cierta medida el problema. La estrategia pasará entonces por calcular una elipse de translación mínima¹ y asegurar que la misma no colisiona con el objeto al rotarla. El análisis detallado se va a realizar para *esferoides oblongos con eje de rotación horizontal*, ampliándose posteriormente para el resto de los casos.

La elipse mínima va a ser calculada como aquella que pase justo rozando la *bounding box* del objeto. El punto más crítico, el que condiciona cuál es la menor elipse de revolución que enmarca dicha *bounding box*, será su diagonal en el plano de rotación de la cámara. En el caso de los objetos cuyo eje de rotación es horizontal (eje X) este es el plano YZ. Para el caso que nos compete, el punto en el que un esferoide colisionaría por primera vez con el objeto es el punto p mostrado en el diagrama Figura 53a. El esferoide que toca ese punto sería el más pequeño posible y estaría construido por la elipse que al ser rotada pasa justo por ese punto. Si ahora esa elipse se gira alrededor del eje X hasta alcanzar el plano XZ se obtienen el punto p' , como se muestra en la Figura 53b.

¹ Una elipse que cumple dos condiciones: (1) no colisiona con ninguna parte del objeto durante su movimiento de translación y (2) al girar sobre su eje de rotación tampoco colisiona con ninguna parte del objeto. Pero que si tuviese un radio menor sí podría colisionar con alguna parte del objeto.

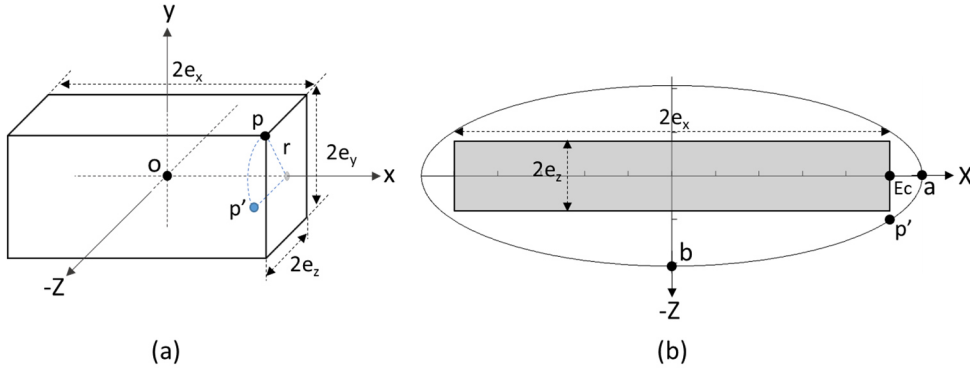


Figura 53. Representación del planteamiento empleado para resolver el problema de la elipse mínima en objetos oblongos con eje de revolución horizontal. En (a) se ve la *bounding box* de un objeto, el punto p de la superficie del objeto donde colisionaría el esferoide mínimo y el resultado de abatir ese punto sobre el plano horizontal, p' . En (b) se muestra la elipse mínima en el plano horizontal (XZ).

El sistema de ecuaciones que permite obtener las dimensiones de la elipse mínima estaría formado por:

- (1) la ecuación de la circunferencia en el plano YZ de radio r que pasa por el punto p' , expresión (57).
- (2) la ecuación de la elipse en el plano XZ que pasa por ese mismo punto. Esto implica buscar el valor de z en la ecuación de la elipse cuando $z^2|_{x=E_c}$. Ver expresión (60).

$$y^2 + z^2 = r^2 \begin{cases} \text{punto } p \rightarrow \begin{cases} y = e_y \\ z = e_z \end{cases} \rightarrow r^2 = e_y^2 + e_z^2 \\ \text{punto } p' \rightarrow \{y = 0\} \rightarrow z^2 = r^2 \end{cases} \quad (57)$$

$$z^2 = e_y^2 + e_z^2 \quad \text{Circunferencia en el punto } p'$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \rightarrow z^2|_{x=E_c} = b^2 \left(1 - \frac{E_c^2}{a^2} \right) \quad \text{Elipse en el punto } p' \quad (58)$$

Igualando ambas expresiones en el punto p' se obtiene la expresión (61), donde ahora el objetivo deseado es obtener los valores de los semiejes, a y b , que representan a esta elipse mínima.

$$e_y^2 + e_z^2 = b^2 \left(1 - \frac{E_c^2}{a^2} \right) \quad (59)$$

Cabe recordar ahora que se están definiendo las elipses de tal forma que existe una relación entre esos semiejes, que viene dada por la expresión $E_c = \left(a - \frac{b^2}{a} \right)$, ver ecuación (18) en la sección 3.2.2.3. Se puede simplificar entonces la ecuación obtenida dejando un semieje en función del otro, $b = \sqrt{a^2 - a * E_c}$, lo que conduce a la expresión (60).

$$a^3 - E_c a^2 - (E_c^2 + r^2) a + E_c^3 = 0 \quad (60)$$

El resultado obtenido es una ecuación cubica que tiene la forma $x^3 + Ax^2 + Bx + C = 0$. Para darle solución se van a emplear las ecuaciones de Cardano-Ferrari.

El primer paso en la búsqueda de la solución es verificar que existen soluciones reales al problema, para ello es necesario calcular el discriminante (Δ) empleando la expresión (61).

$$\Delta = \left(\frac{q}{2} \right)^2 + \left(\frac{p}{3} \right)^3 \quad \text{donde} \quad \begin{cases} p = \frac{3B - A^2}{3} \\ q = \frac{2A^3 + 9AB + 27C}{27} \end{cases} \quad (61)$$

El cálculo de este discriminante conduce a la expresión (62). En la misma se observa que su valor es siempre menor que cero, por tanto, se puede asegurar que el problema tiene como solución tres raíces reales.

$$\Delta = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 = \frac{-1}{729} \left(216E_c^4 r^2 + \frac{351}{4}E_c^2 r^4 + 27r^6\right) \quad (62)$$

Para obtener ahora estas raíces es necesario resolver la expresión (63) particularizada para nuestro problema. Resolviendo la misma para valores de k entre 0 y 2 se obtienen las tres raíces, mostradas en la expresión (64), que son posible solución al problema planteado.

$$a_k = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos\left(\frac{\theta + 2k\pi}{3}\right) - \frac{A}{3}$$

$$\text{donde } \begin{cases} k = 0, 1, 2 \\ \theta = \arccos\left(\frac{-q/2}{\sqrt{-(p/3)^3}}\right) \text{ con } 0 < \theta < \pi \end{cases} \quad (63)$$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{3} \sqrt{4E_c^2 + 3r^2} \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) + \frac{E_c}{3} \\ a_1 = \frac{2}{3} \sqrt{4E_c^2 + 3r^2} \cos\left(\frac{\theta + 2\pi}{3}\right) + \frac{E_c}{3} \\ a_2 = \frac{2}{3} \sqrt{4E_c^2 + 3r^2} \cos\left(\frac{\theta + 4\pi}{3}\right) + \frac{E_c}{3} \end{cases} \quad (64)$$

Se han obtenido pues tres candidatas como solución al problema de la elipse mínima. Para averiguar cual o cuales de ellas son una solución válida al problema se han graficado estas tres raíces en función del valor del radio r , asumiendo que: (1) E_c tiene un valor normalizado de uno y (2) que el radio r toma valores entre 0 y 3¹, ver Figura 54.

Se puede observar que la solución a_0 es la única válida para el problema que se está resolviendo. Puesto que cumple que cuanto mayor

¹ En realidad, no hubiera sido necesario estudiar r en un intervalo tan amplio ya que el caso que se estudia es el del esferoide oblongo y, por tanto, E_c será mayor que las otras dimensiones del objeto.

es el objeto, mayor es la elipse que lo enmarca. Por el contrario, la solución \mathbf{a}_1 se podría descartar por ser siempre negativa, lo que carece de sentido para el valor del semieje de una elipse. Y la solución \mathbf{a}_2 se podría descartar porque el valor que propone es siempre igual o inferior al valor de E_c . Sin embargo, por construcción se ha visto que es al revés, la cúspide de la evoluta tiene siempre un valor inferior al semieje mayor de la elipse.

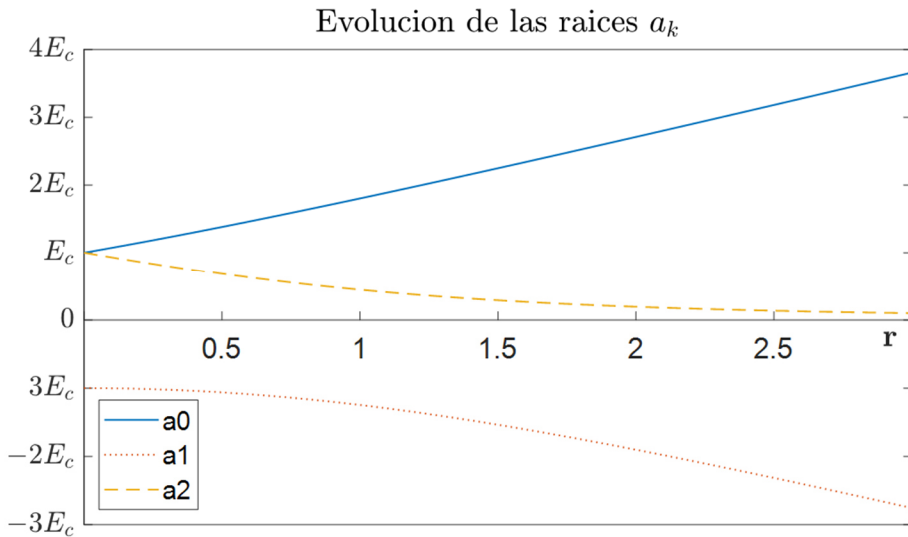


Figura 54. Evolución de las raíces en función del valor de r , para un valor de E_c normalizado.

Para confirmar los resultados obtenidos observando la gráfica se ha realizado un estudio en la frontera. En él se estudia el comportamiento de las raíces cuando el radio tiende a cero y cuando tiende a infinito. Esto es equivalente a ver qué ocurre cuando el objeto es muy alargado y cuando es muy aplanado. En la expresión (65) se muestra este estudio cuando el valor del ángulo θ y el de las raíces cuando r tiende a 0, y a continuación en la expresión (66) cuando r tiende a infinito. Los resultados en el límite confirman el análisis previo y permiten descartar las soluciones \mathbf{a}_1 y \mathbf{a}_2 .

$$\lim_{r \rightarrow 0} \theta = \arccos\left(\frac{-8 E_c^3}{8 E_c^3}\right) = \pi$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} a_k = \begin{cases} a_{0 \ r=0} = \frac{2}{3} 2E_c \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + \frac{E_c}{3} = E_c \\ a_{1 \ r=0} = \frac{2}{3} 2E_c \cos\left(\frac{\pi + 2\pi}{3}\right) + \frac{E_c}{3} = -E_c \\ a_{2 \ r=0} = \frac{2}{3} 2E_c \cos\left(\frac{\pi + 4\pi}{3}\right) + \frac{E_c}{3} = E_c \end{cases} \quad (65)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \theta = \arccos\left(\frac{-1 - 9E_c r^2}{2 \sqrt{27r^6}}\right) = \arccos\left(\frac{1}{\infty}\right) = \frac{\pi}{2}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} a_k = \begin{cases} a_{0 \ r=\infty} = \frac{2}{3} \sqrt{3} r \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = r \\ a_{1 \ r=\infty} = \frac{2}{3} \sqrt{3} r \cos\left(\frac{\pi + 4\pi}{6}\right) = -r \\ a_{2 \ r=\infty} = \frac{2}{3} \sqrt{3} r \cos\left(\frac{\pi + 8\pi}{6}\right) + \frac{E_c}{3} = \frac{E_c}{3} \end{cases} \quad (66)$$

Finalmente, se ha llegado a la resolución del problema. Se ha obtenido el valor del semieje mayor de la elipse de trayectoria mínima y mediante la expresión que los relaciona es posible obtener el valor del semieje menor. Esto lleva a la expresión siguiente válida para *esferoides oblongos con eje de rotación horizontal*.

$$\begin{cases} a_{min} = \frac{2}{3} \sqrt{4E_c^2 + 3r^2} \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) + \frac{E_c}{3} \\ b_{min} = \sqrt{a_{min}^2 - E_c a_{min}} \end{cases} \quad (67)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{-1}{2} \frac{16E_c^3 - 9E_c r^2}{\sqrt{(64E_c^6 + 144E_c^4 r^2 + 108E_c^2 r^4 + 27r^6)}}\right)$$

Se puede hacer ahora el análisis para los *esferoides oblatos* con eje horizontal, la situación es la mostrada en la Figura 55. En este caso las dimensiones del objeto son menores en el eje X, que es el de rotación. Del mismo modo que antes, la diagonal de la caja delimitadora del objeto en el plano vertical YZ condicionará cuál es el elipsoide de revolución más pequeño que enmarca el objeto. Por tanto, la elipse más pequeña en el plano XZ está condicionada por el punto p , esto es, por el valor del radio r en la figura.

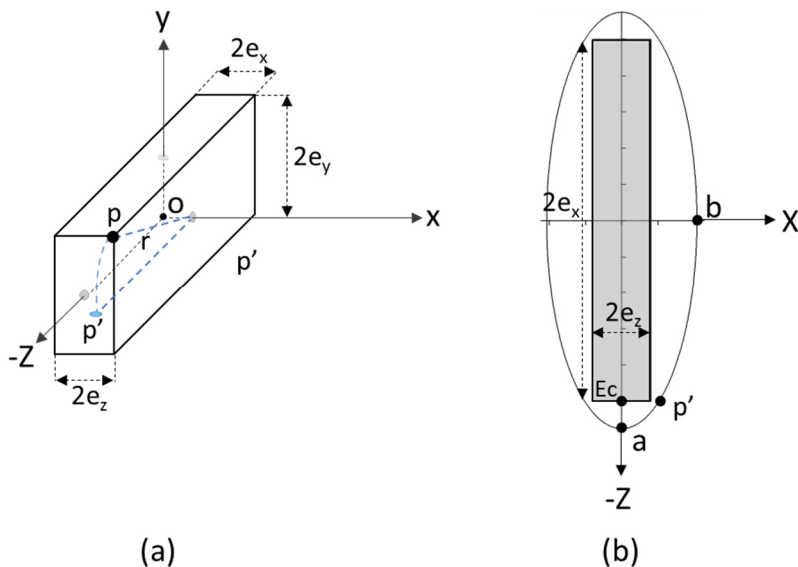


Figura 55. Representación del planteamiento empleado para resolver el problema de la elipse mínima en objetos oblatos con eje de revolución horizontal. En (a) se representa la *bounding box* del objeto, el punto crítico de su superficie p y el resultado de abatir ese punto, p' , sobre el plano XZ. En (b) se muestra la elipse mínima sobre el plano horizontal.

El sistema de ecuaciones que permite resolver estaría formado, de nuevo, por (1) la ecuación de la circunferencia de radio r en el plano, es decir que pasa por el punto p' y (2) por la ecuación de la elipse en el plano XZ que pasa por ese mismo punto. La diferencia en este caso es que el semieje mayor de la elipse está en el eje Z y el eje menor en el eje

X. Para resolver el sistema igualamos, de nuevo, las expresiones en el punto p' . Para esto ahora se busca el valor de x en la ecuación de la elipse tal que $x^2|_{z=E_c}$, lo que da lugar a la expresión (68). Si nos fijamos esta es la misma expresión (59), que se obtuvo para el caso de esferoides oblongo. Por tanto, la solución (67) es válida para esferoides oblongos y para oblatos, con eje de rotación horizontal.

$$\left\{ \begin{array}{l} e_y^2 + e_z^2 = r^2 \\ \frac{x^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} = 1 \end{array} \right\} \rightarrow x^2|_{z=E_c} \rightarrow e_y^2 + e_z^2 = b^2 \left(1 - \frac{E_c^2}{a^2} \right) \quad (68)$$

Las soluciones obtenidas serían también validadas para un eje de rotación vertical. Para ello solo es necesario realizar una rotación del problema completo, es decir, basta con hacer un cambio de variable, intercambiando los ejes X e Y , en las soluciones obtenidas aquí.

3.2.4 Limitaciones y desafíos

En este apartado, se van a examinar las limitaciones inherentes al sistema de navegación basado en esferoides y se evaluarán posibles estrategias para su superación. Estas limitaciones surgen de la incapacidad de los dos parámetros empleados en la definición de nuestro sistema de navegación, a saber, la *bounding box* del objeto y el eje de rotación preferido en el modelo mental del usuario, para abarcar todas las posibles configuraciones geométricas de los objetos de forma satisfactoria.

Una primera fuente de complicaciones reside en la posibilidad de que la forma real de los objetos presente diferencias significativas con respecto a la *bounding box* utilizada como parámetro en la técnica. En este contexto, esto se refiere a que los objetos adopten formas sustancialmente distintas a una caja, dando lugar a discrepancias geométricas. Este fenómeno se manifiesta, por ejemplo, cuando ciertas partes, como una antena extensa, se separan considerablemente del

cuerpo principal del objeto, generando una *bounding box* que difiere notoriamente de la estructura masiva central del mismo.

La principal implicación de este inconveniente se encuentra en la posible falta de alineación de esta sección extensa con el eje de rotación establecido en la técnica de navegación basada en esferoides. Esto podría derivar en que la cámara se oriente hacia el vacío en posiciones específicas después de ciertas combinaciones de movimientos de traslación y rotación, tal como se visualiza en la Figura 56a. En contraste, en un enfoque clásico de navegación basado en esferas, este problema no se presentaría, dado que la cámara siempre permanecería enfocada en el centro de la *bounding box* del objeto. Sin embargo, si aparece un problema análogo con un objeto que tuviese un vacío en su centro, aunque esta dificultad podría solventarse limitando la esfera mínima para asegurar que el objeto esté siempre completamente contenido, ver Figura 56b.

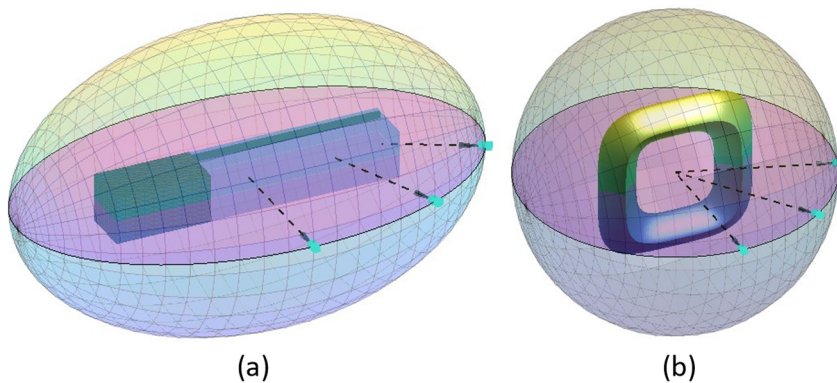


Figura 56. En (a) un objeto ficticio que posee un saliente descentrado con respecto al eje de rotación. En (b) un objeto con un vacío en el centro.

Establecer el eje de rotación presenta asimismo desafíos, ya que puede haber situaciones en las que no resulte evidente cuál es el eje de rotación intrínseco en el modelo mental del usuario. Aunque un objeto exhiba un claro eje geométrico, este no necesariamente coincide con el eje de rotación según la percepción del usuario. En la Figura 57 se muestra el

modelo tridimensional de una rueda de molino, cuyo eje de simetría atraviesa su centro, indicando así que su eje de rotación intrínseco es horizontal. Sin embargo, el usuario podría considerar más apropiado un eje de rotación vertical en ciertos casos, por ejemplo, si desea realizar una órbita alrededor de dicho eje. De este modo, parece que el eje de rotación del objeto en el modelo mental del usuario se revela al considerar el contexto externo al objeto en sí mismo. Por consiguiente, determinar el eje de rotación para la navegación resulta complejo y debería formar parte integral del modelo del objeto, un aspecto que se abordará en detalle en el capítulo 5 Propuesta de Modelo.

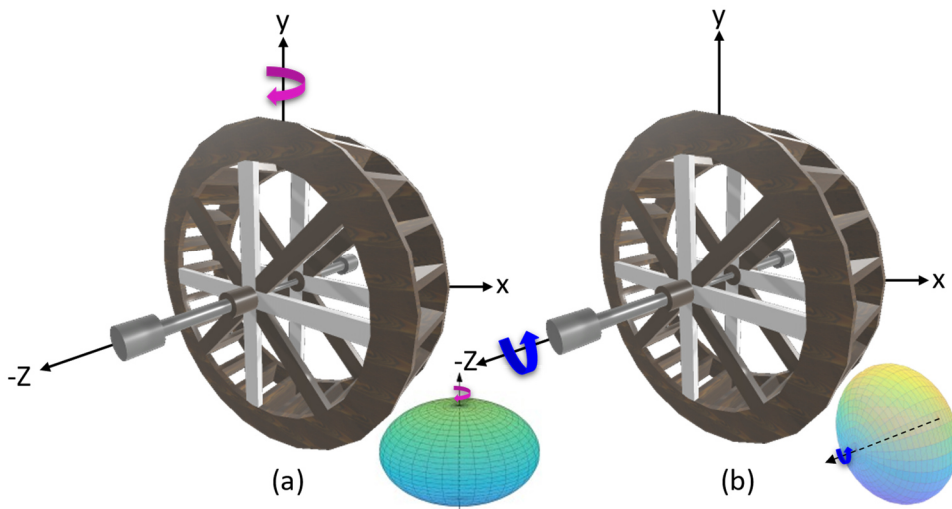


Figura 57. Ilustración del modelo 3D de una rueda de molino, cuyo eje de geométrica de simetría es horizontal. En (a) se muestra el esferoide de navegación con un eje de rotación vertical y en (b) con eje de rotación horizontal.

La elección del eje de rotación puede, además, generar complicaciones durante la navegación si existe una gran discrepancia con la forma geométrica del objeto. Es preciso recordar en este punto que el esferoide utilizado en la navegación se adapta al objeto conforme al eje de rotación seleccionado. Por lo tanto, el sistema utilizará un esferoide oblongo u

oblato si el eje elegido coincide o no con el lado mayor de la *bounding box*, como se ilustra en la Figura 23 del apartado 3.2.1.2.

Para clarificar este concepto de discrepancia entre el eje de rotación y la geometría, consideremos ahora el ejemplo de un modelo de autobús, como se muestra en la Figura 58a. El eje del autobús, si se trata este como un objeto geométrico aislado, es horizontal, esencialmente se puede ver como un cilindro tumbado con ruedas. Si este es el eje seleccionado, el sistema utilizará un elipsoide oblongo, y la navegación transcurrirá sin inconvenientes. No obstante, no es posible separar el autobús de su contexto; es un elemento cotidiano que solemos visualizar en posición horizontal sobre el suelo. Por ende, resulta poco probable que el usuario desee visualizarlo “volcado”. En este caso, tiene sentido pensar que se optará por un eje de rotación vertical, lo que conllevará el uso de un elipsoide de tipo oblató para ajustarse a la geometría. Esta combinación puede generar problemas con la orientación de la cámara durante la navegación, dependiendo de las proporciones geométricas específicas del objeto.

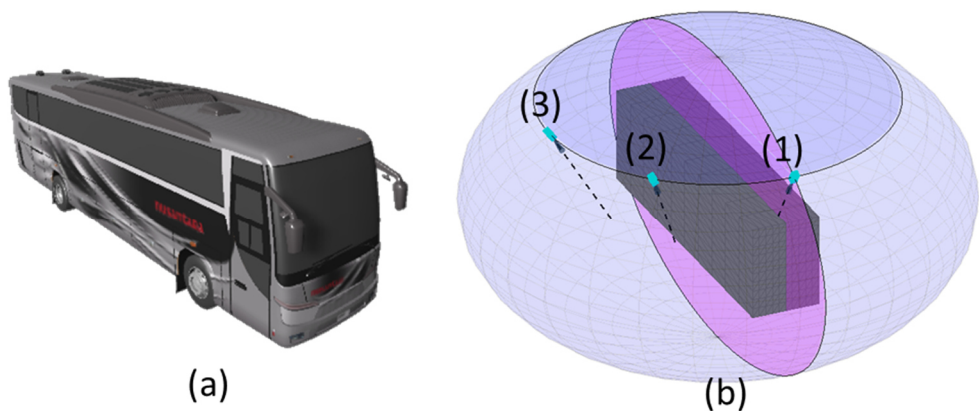


Figura 58. Ilustración del problema de la orientación de la cámara en esferoides oblatos cuando los objetos tienen su lado mayor fuera del eje de rotación y son muy asimétricos. En (a) se muestra el modelo 3D de un autobús, en (b) se ilustra tres posiciones de la cámara durante un movimiento de rotación.

En el caso de los esferoides oblatos, y dependiendo de las proporciones geométricas del objeto, durante la navegación pueden surgir momentos en los que la cámara deja de enfocar directamente la superficie del objeto. A pesar de que el objeto permanece dentro del campo de visión de la cámara y, por ende, en la pantalla, el centro de la pantalla puede dirigirse hacia puntos que no contienen partes del objeto. Esta situación podría resultar molesta para el usuario, afectando así la usabilidad del sistema. A continuación, se proporcionará una explicación más detallada para exponer en profundidad la raíz de este problema.

Como se discutió en la sección 3.2.2.2, existe una disparidad en el comportamiento entre esferoides oblongos y oblatos con respecto a la orientación de la cámara. En los esferoides oblongos, la cámara mantiene su orientación hacia puntos del eje de rotación, a diferencia de los esferoides oblatos. En estos últimos, la cámara se centra en puntos que están contenidos en el plano perpendicular al eje de rotación elegido, como se ilustró en la Figura 31. Este efecto condiciona la elección del valor de E_c al buscar los radios del elipsoide de navegación, como se detalla en la sección 3.2.2.3. En este contexto, se optó por asignar, para el eje horizontal, el valor de E_c como el mayor de la dupla $[e_z, e_y]$, dando lugar a la expresión (23). La consecuencia de esta decisión, que favorece un desplazamiento continuo de la cámara por toda la superficie del objeto, es que, en determinados ángulos de rotación, la cámara podría orientarse hacia puntos vacíos, donde no hay ninguna parte del objeto, como se ilustra en la Figura 58b.

En la Figura 59 se ilustra esta situación desde el punto de vista de la cámara, de tal forma que las imágenes (b), (c) y (d) corresponden respectivamente a las situaciones (1), (2) y (3) de la Figura 58b. Se puede ver como la cámara enfoca el objeto en (a) y (b), pero tras realizar movimientos de traslación y rotación se llega a posiciones, (c) y (d), en que la cámara no enfoca directamente puntos del objeto. Como se observa, esta situación no implica que el objeto salga por completamente de la visión de la cámara, pero es indudable que no deja de ser una

situación poco deseable. Este problema es más evidente cuando mayor sea la asimetría del objeto, y se manifestará en mayor medida cuanto más cerca se encuentre la cámara del objeto.

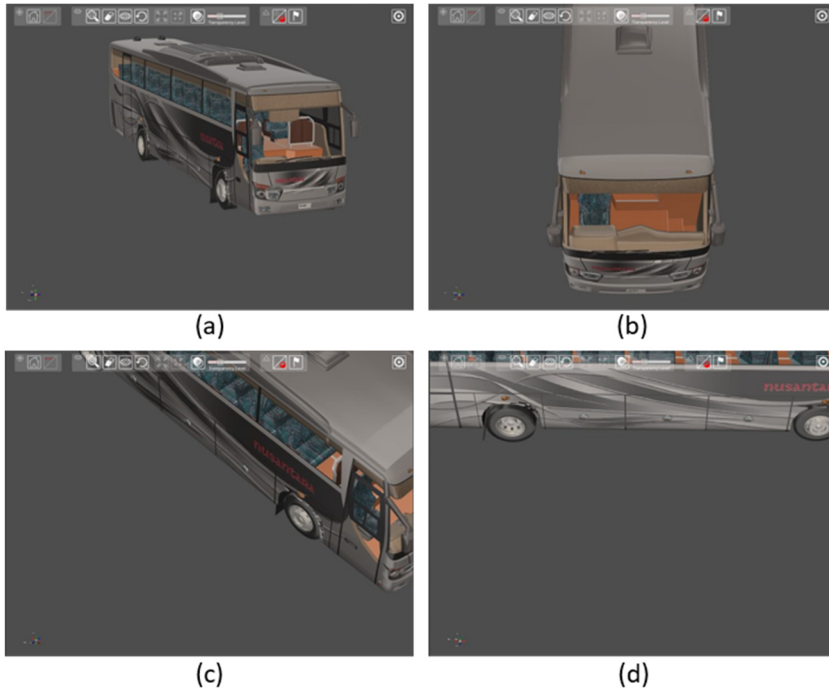


Figura 59. Vistas de la cámara del modelo 3D de un autobús usando navegación esférica. Las imágenes (b), (c) y (d) corresponden respectivamente a las situaciones (1), (2) y (3) de la Figura 58.

3.2.4.1 Posibles soluciones

De las limitaciones señaladas, en esta sección se va a explorar posibles soluciones a la última de ellas. Esto es, a las situaciones en que la cámara deja de enfocar de forma directa al objeto debido a el eje de rotación elegido se ha alineado con el semieje menor de la elipse.

La solución trivial al problema pasa por cambiar el eje de rotación. Si esta elección se realiza de forma automática, ya sea mediante un

algoritmo o mediante el uso de IA, esta solución parece la más acertada. Sin embargo, si este eje de rotación preferido está relacionado con el modelo mental que un usuario tiene sobre el objeto, no queda otra opción que descartar esta idea y buscar una solución más elaborada.

De estas otras posibles soluciones; una primera opción es la de calcular el elipsoide de navegación, sus semiejes, a partir de la menor de las dimensiones de la *bounding box* en el plano perpendicular al eje de rotación y no de la mayor como se hizo en las expresiones (23) y (26). Eso es, modificar estas expresiones siendo ahora $E_c = \min[e_y, e_z]$ para el eje de rotación horizontal o $E_c = \min[e_x, e_z]$ si es el caso de eje de rotación vertical.

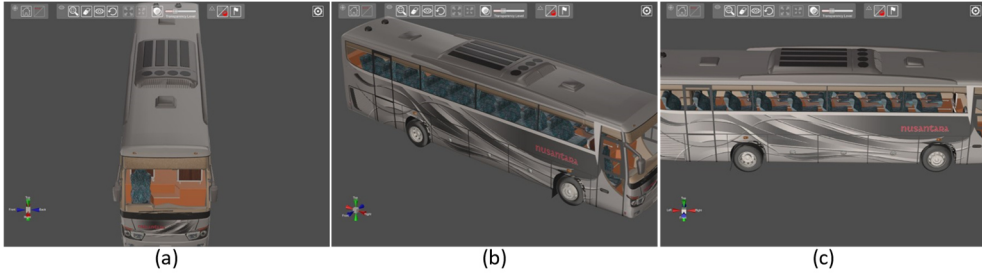


Figura 60. Vistas de la cámara del modelo 3D de un autobús tras hacer que $E_c = \min[e_x, e_z]$ en la expresión (26). Las imágenes corresponden a las mismas situaciones (b), (c) y (d) de la Figura 59.

En la Figura 60 se ha ilustrado el resultado de aplicar este cambio en la forma de calcular el elipsoide. Por otro lado, la consecuencia negativa de este cambio es que ahora en uno de los planos de rotación la evoluta se ajusta con el borde del objeto, pero en el resto de ellos la evoluta estará dentro del mismo, tal y como se mostraba en la en la Figura 35b. Es decir, en los extremos la cámara no enfocará a directamente a puntos del objeto, sino que esta detendrá su enfoque durante el movimiento de translación en puntos más centrados. El efecto visual para el usuario es que al acercarse al borde del objeto lo estará viendo en un ángulo más forzado. El enfoque de la cámara se parecerá más al de una navegación esférica y por tanto el *travelling* de la cámara se verá perjudicado, sobre

todo en las zonas extremas y muy cercanas al objeto, como se ilustra en la Figura 61. Aunque es cierto que la asimetría del objeto hará que este efecto sea más o menos apreciable.



Figura 61. Vista del modelo del autobús cuando la cámara está situada muy cerca del objeto y próxima al extremo de la elipse de traslación. En (a) se muestra el resultado cuando se adopta la solución presentada en la ecuación (26), y en (b) cuando se modifica para haciendo que $E_c = \min[e_x, e_z]$.

Una posible solución de compromiso sería calcular el esferoide de navegación en un punto medio, eligiendo E_c en un punto intermedio entre las dos dimensiones de la *bounding box* de interés, en ese caso para eje de rotación vertical la expresión (26) quedaría como $E_c = 1/2(e_x + e_z)$. Esta solución llevaría a tener los dos efectos indeseados a la vez, uno en cada uno de los extremos de la rotación, pero cada uno de ellos de forma más atenuada.

Otra posibilidad para dar solución a este problema pasa por modificar la orientación de la cámara para estos casos, pero sin cambiar el elipsoide de navegación. Esto no es un cambio menor, sino que se trata de un cambio de paradigma con respecto al planteamiento inicial, en la cámara ya no miraría siempre de forma perpendicular a la elipse de traslación. Este cambio se traduciría en cambiar el valor de la cúspide de la evoluta solo en la expresión que calcula el punto de enfoque de la cámara. De tal forma que: para eje de rotación horizontal la expresión (24) se vería

modificada siendo ahora $E_c = \min [e_y, e_z]$, mientras que para el eje de rotación vertical la modificada sería la expresión (26), $E_c = \min [e_x, e_z]$, en la ecuación del punto de enfoque. Desde el punto de vista visual, para el usuario, los resultados no difieren en gran medida de la solución previamente sugerida.

Una solución más sofisticada, una vez se prescinde del paradigma de mirar de forma perpendicular a la elipse de translación, pasaría por hacer que el valor de la cúspide de la evoluta cambie mientras se está realizando el movimiento de rotación. De esta forma el valor de E_c evolucionaría según el valor de las dimensiones de la *bounding box* en cada uno de los planos de rotación extremos, horizontal y vertical. Para el eje de rotación horizontal la cúspide de la evoluta se calcularía ahora mediante la siguiente expresión.

$$E_c = \sqrt{(e_z * \sin \theta)^2 + (e_y * \cos \theta)^2} \quad (69)$$

Esta solución implica por tanto un cambio en el punto al que mira la cámara que depende del ángulo de rotación. Ocurre que esta solución lleva a un sistema en el que se puede llegar a enfocar al mismo punto desde distintas perspectivas, según los gestos o acciones de navegación que se realicen. Lo que incumpliría los principios enunciados por (Bade et al., 2005b).

3.2.4.1 Conclusiones

En este apartado se han presentado situaciones en los que aparecerán problemas con la orientación de la cámara, los cuales requieren que la elección del eje de rotación sea muy discordante con la geometría del objeto y que además este sea muy asimétrico. Sin embargo, se han estudiado en profundidad y se han propuesto distintas soluciones. Aunque es cierto que ninguna de las soluciones propuestas consigue dar una respuesta que sea satisfactoria en todos los casos. Dos de ellas se podrían considerar válidas desde el punto de vista de la usabilidad percibida por el usuario, ya que parecen dar resultados satisfactorios con

unos inconvenientes mínimos y difíciles de percibir, aunque haría falta realizar distintas pruebas para corroborarlo. Se trata de las soluciones que, o bien modifican la obtención de los semiejes del esferoide de navegación, o solo la dirección de la orientación de la cámara, a partir de elegir E_c como el menor valor de la *bounding box* del objeto en el plano de rotación.

Entre otros motivos, esto nos lleva a plantear una nueva solución al problema de la navegación, basada esta vez en un sistema de navegación elipsoidal triaxial.

3.3 Navegación elipsoidal

Tras la navegación esferoidal parece interesante seguir explorando esa línea de investigación, esto es, buscando técnicas de navegación que, manteniendo la simplicidad de las *Virtual Trackball*, puedan adaptarse a la geometría de los objetos. Se busca ir un paso más allá, consiguiendo una mejor adaptación a la geometría de los objetos. Uno de los problemas que se han mencionado en la navegación esferoidal es que no todos los objetos van a tener simetría de revolución alrededor de un eje de rotación, lo que podría causar una merma en la usabilidad cuando se emplea en ellos. Esto, que es totalmente cierto, no nos hace desistir de nuestra hipótesis principal, los objetos van a tener un eje de rotación prioritario en el modelo mental del usuario, tengan o no simetría de revolución alrededor del mismo. En este punto, la siguiente etapa en la investigación en técnicas de navegación que se propone en esta tesis es la de diseñar una técnica de navegación que emplee elipsoides genéricos o triaxiales, en lugar de esferoides. Estos elipsoides triaxiales van a tener la ventaja de adaptarse a las tres dimensiones de la *bounding box* del objeto de manera independiente.

En este nuevo sistema de navegación, la cámara se va a mover sobre la superficie de elipsoides virtuales que envolverán a los objetos. Como un elipsoide triaxial puede tener sus tres semiejes distintos se va a

adaptar mejor a la forma de los objetos lo cual, según nuestra hipótesis, podría llevar a una mejora de la usabilidad percibida por el usuario. El precio que habrá que pagar será un aumento de la complejidad con respecto a la navegación esférica. Por suerte se trata de una generalización de esta última, lo que va a permitir aprovechar muchos de los resultados ya obtenidos.

El objetivo de este capítulo será, por consiguiente, el desarrollo de una navegación elipsoidal genérica o triaxial, partiendo del desarrollo llevado a cabo con anterioridad para la navegación basada en esferoides. Quedará pendiente para trabajos futuros comprobar si el hipotético aumento de la usabilidad justifica el aumento de complejidad.

Se va a comenzar recordando algunas propiedades matemáticas y exponiendo algunas decisiones de diseño, se clasificarán los distintos objetos, se diseñará un método para calcular el elipsoide en función de la geometría y se resolverán los movimientos de la cámara en latitud, longitud y radiales.

3.3.1 Formulación Teórica y decisiones de diseño

El diseño de la navegación elipsoidal se va a apoyar en las decisiones de diseño y en los resultados obtenidos en las secciones correspondientes de la navegación esférica. Por tanto, muchos conceptos se darán o bien por conocidos o bien se pasará sobre ellos de forma abreviada.

Se retoma la ecuación (70) que define un elipsoide genérico o triaxial centrado en el origen con sus semiejes en los ejes de coordenadas. En el caso esférico se realizaba una simplificación igualando dos de los semiejes, ya que se trata este de un elipsoide de revolución. Ahora será necesario obtener el valor de los tres semiejes para poder definir el elipsoide virtual.

$$\frac{x^2}{r_x^2} + \frac{y^2}{r_y^2} + \frac{z^2}{r_z^2} = 1 \quad (70)$$

La aproximación al problema va a ser, sin embargo, parecida a la que se siguió para el caso esferoidal. En este se definió una trayectoria elipsoidal en un plano, ya fuese este vertical u horizontal, que se rotaba alrededor de un eje. Esta sencilla idea se puede mantener ahora en la navegación elipsoidal, a saber, se definirá una elipse de translación en uno de los planos y esta elipse se “rotará” alrededor de uno de los ejes. Sin embargo, la diferencia crucial reside en que, en la navegación elipsoidal, la trayectoria de rotación será elipsoidal¹ en lugar de circular.

La estrategia para resolver el problema va a consistir en, dado un objeto 3D y un eje de rotación preferido para el mismo, calcular los tres semiejes que definen el elipsoide de navegación, empleando para ello distintas consideraciones geométricas.

Se podría decir que estos tres ejes van a definir dos elipses: una primera elipse, que llamaremos de translación, igual a la ya presentada a en caso esferoidal y que es la que recorre la cámara en los movimientos en latitud (o de translación); y una segunda elipse, que llamaremos de rotación, que va a ser el camino que recorre la elipse de translación en los movimientos alrededor del eje intrínseco del objeto (o de rotación). Esto implica que ahora que, tras cada movimiento de rotación, la elipse de translación cambiará. En la Figura 62b se ha tratado de ilustrar este procedimiento: la elipse de translación, en violeta, va cambiando su forma durante una rotación según va fijando la forma de la elipse de rotación, en azul en la Figura 62a.

¹ Cabe recordar que un elipsoide se define como una superficie cerrada cuyas tres secciones ortogonales principales son elipses.

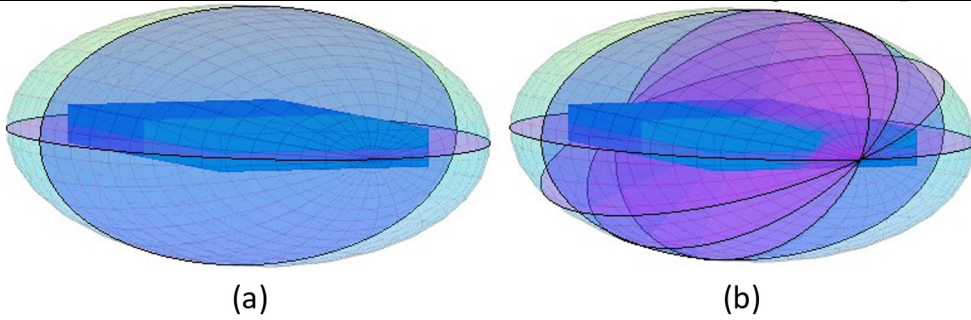


Figura 62. Objeto envuelto por un elipsoide triaxial con eje de rotación horizontal. En (a) se muestra la elipse de traslación, en violeta, y en azul la elipse de rotación. Mientras en (b) se muestra como la elipse de traslación cambia su forma mientras rota siguiendo a la elipse de rotación.

Para llevar a cabo todo este el análisis se van a realizar las mismas suposiciones iniciales que en el caso esferoidal; se va a reducir toda la información geométrica del objeto a su *bounding box* alineada con los ejes, se va a asumir que el centro del objeto está localizado siempre en el origen de coordenadas y que la cámara inicialmente está situada sobre el eje Z. Con respecto a la orientación de la cámara se va a mantener la misma estrategia inicial, la cámara se orientará perpendicularmente a la elipse de translación y hacia el centro de curvatura de esta en el punto donde se encuentra.

3.3.1.1 Clasificación de objetos

En la sección previa se realizó una taxonomía muy sencilla de los objetos que los clasificaba en alargados o achatados, en función de su forma geométrica y su eje de rotación preferido. Esta taxonomía permitía encapsularlos de forma fácil en esferoides oblongos u oblatos, verticales u horizontales.

Cabe resaltar que el objetivo principal de este nuevo sistema de navegación elipsoidal es lograr un mejor ajuste del elipsoide virtual a la forma del objeto. Al poder elegir ahora el valor de los tres semiejes del elipsoide de manera independiente se disponen de más grados de libertad,

lo que posibilita refinar la clasificación de objetos que se había desarrollado previamente, en busca de ese mejor ajuste elipsoide-objeto.

La clasificación se va a seguir basando en la geometría de los objetos encapsulándolos en distintos tipos de elipsoides, pero se van a añadir consideraciones relativas a la dirección a la que enfocaría la cámara. Aprovechar todo el conocimiento adquirido durante el desarrollo de la navegación esférica. Esto lleva a que: se van a seguir empleando las categorías de objetos alargados y achatado, pero ahora se harán distinciones dentro de estos últimos. Esto llevará a la aparición de una casuística un poco más complicada que la que se tenía en el caso de los esferoides.

- **Objetos alargados**

Como se puede apreciar en la Figura 63 este tipo de objetos son aquellos en que la dimensión mayor de su *bounding box* coincide con el eje de rotación preferido en el modelo mental del usuario. Por tanto, las dimensiones de estos objetos cumplen que, dependiendo del eje de rotación:

$$\text{Si eje rot. horizontal } \begin{cases} e_x > e_y \\ e_x > e_z \end{cases} \quad \text{Si eje rot. vertical } \begin{cases} e_y > e_x \\ e_y > e_z \end{cases} \quad (71)$$

Esta geometría implica que la elipse de translación tendrá en todo momento su semieje mayor sobre el eje de rotación¹, en consecuencia, en estos objetos la cámara siempre estará enfocadas en puntos contenidos en el eje de rotación.

¹ Es necesario recordar que las perpendiculares a una elipse cortan siempre al semieje mayor de la misma.

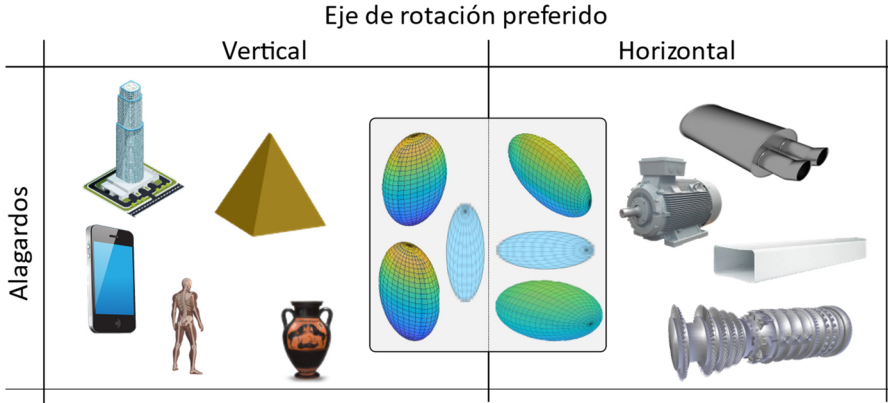


Figura 63. Ejemplos de objetos alargados y posibles formas de los elipsoides triaxiales que los envolverían. Se incluye el caso esferoidal, pues se trata ahora de un caso particular, cuando el objeto es simétrico en dos de sus ejes.

- **Objetos achatados**

Se trata de objetos en donde su lado mayor no coincide con el eje de rotación definido para el objeto. Pudiera ser que el lado del objeto que coincide con el eje de rotación fuese el más pequeño de los tres, o que fuese el intermedio. Esto dar lugar a dos subcategorías que se van a estudiar por separado.

- **Tipo I**

Cuando la dimensión del objeto que coincide con el eje de rotación es la más pequeña de las tres, Figura 64, es decir ocurre que:

$$\text{Si eje rot. horizontal} \begin{cases} e_x < e_y \\ e_x < e_z \end{cases} \quad \text{Si eje rot. vertical} \begin{cases} e_y < e_x \\ e_y < e_z \end{cases} \quad (72)$$

Por este motivo la elipse de translación tendrá en todo momento su semieje menor sobre el eje de rotación. En consecuencia, la cámara estará mirando en todo momento a puntos contenidos en el plano perpendicular al eje de rotación. Tal y como ocurría en el caso de la navegación esferoidal (ver Figura 31b), aunque ahora la trayectoria del punto de enfoque de la cámara sobre ese plano será elipsoidal.

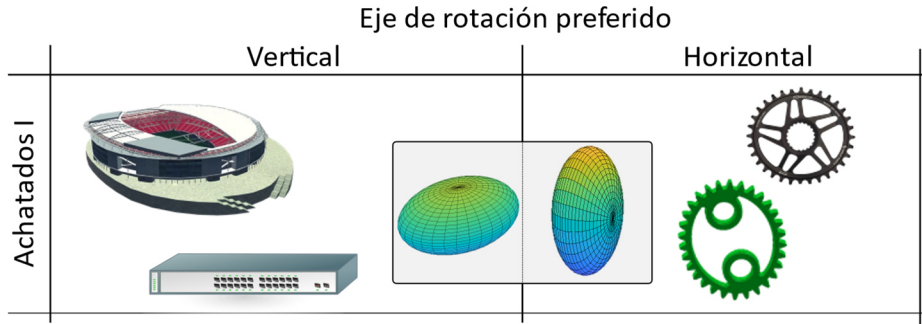


Figura 64. Ejemplos de objetos achatados y de los elipsoides triaxiales que los envolverían. Se trata de objetos cuya dimensión en la dirección del eje de rotación es la menor de las tres.

○ **Tipo II**

En este grupo se van a clasificar aquellos objetos en los que el eje de rotación coincide con la dimensión de su *bounding box* intermedia, ver Figura 65, es decir, ocurre que:

$$\text{Si eje horizontal} \begin{cases} e_z > e_x > e_y \\ e_y > e_x > e_z \end{cases} \quad \text{Si eje vertical} \begin{cases} e_z > e_y > e_x \\ e_x > e_y > e_z \end{cases} \quad (73)$$

La forma de los elipsoides que van a envolver a este tipo de objetos es tal que ocurre que la posición del semieje mayor de la elipse de traslación cambia según la rotación. Como resultado, en determinados momentos la cámara estará enfocando puntos contenidos en el eje de rotación, y en otros momentos a puntos contenidos en uno de ejes perpendiculares al de rotación. En la siguiente sección se estudiará con todo detalle.

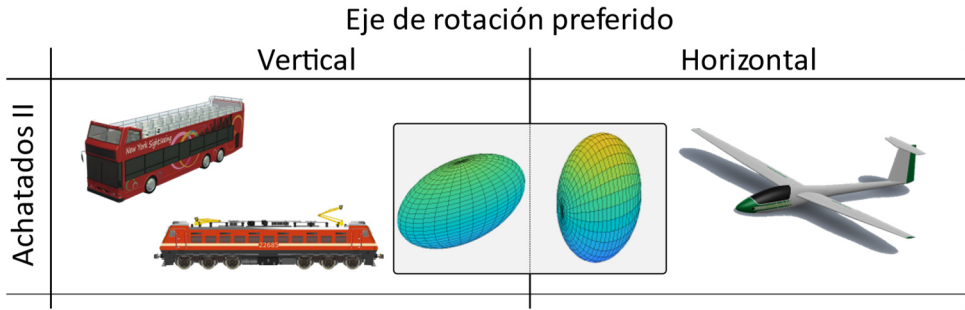


Figura 65. Ejemplos de objetos achatados y de los elipsoides triaxiales los envolverían, en este caso objetos cuya dimensión en la dirección del eje de rotación es la intermedia.

3.3.1.2 Cálculo del elipsoide inicial

En esta esta sección se va a diseñar un procedimiento que, dado un objeto, representado por su *bounding box* de dimensiones $[2e_x, 2e_y, 2e_z]$, y una posición inicial para la cámara proporcione los tres semiejes del elipsoide virtual de navegación. Al igual que en ocasiones anteriores, se va a asumir la cámara inicialmente está situada sobre el eje Z, de modo que sus coordenadas tendrán la forma $(0, 0, Z_0)$. Resolver el problema consiste en definir un elipsoide de navegación que se adapte a la geometría del objeto, para ello se deben obtener los tres radios del elipsoide virtual a partir de la geometría de este. La clasificación de los objetos, realizada previamente, se puede considerar un primer paso en la solución de este problema.

Para realizar el ajuste del elipsoide con la *bounding box* del objeto se va a realizar dos cortes mediante dos planos perpendiculares en el origen, tal y como se ha representado en la Figura 66. En concreto, para el caso de eje de rotación horizontal, el ajuste se realizaría en un corte con el plano horizontal XZ y el plano vertical XY. Esto es equivalente al cálculo de la elipse de traslación que se hacía en el caso de la navegación esferoidal, pero ahora va a ser necesario realizarlo en cada uno de los planos.

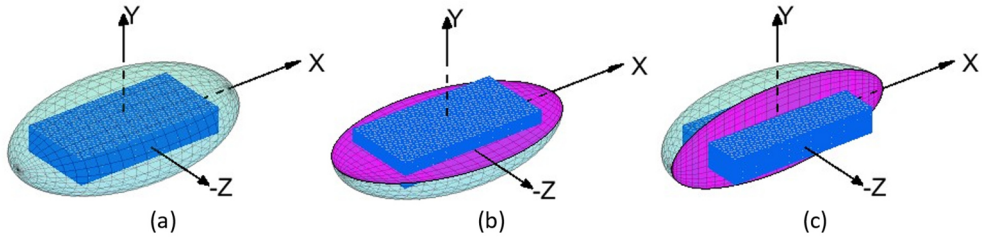


Figura 66. Se ilustra el proceso de cálculo del elipsoide virtual para el caso de eje de rotación horizontal. La elipse de translación se ajustará a la *bounding box* de un objeto 3D en los planos perpendiculares XZ y XY.

Para el cálculo de la elipse de translación se va a emplear la misma metodología que en la navegación esférica. Esto es, para ajustarla a la geometría del objeto se emplearán las expresiones (74) y (75) que se obtuvieron para la navegación esférica, sección 3.2.2.3. Con la primera de ellas se obtiene el valor del semieje mayor de una elipse (a) a partir del semieje menor (b) y la cúspide de la evoluta (E_c), mientras que a través de la segunda se obtiene de forma análoga el valor del semieje menor.

$$a = \frac{1}{2} \left(E_c + \sqrt{E_c^2 + 4b^2} \right) \quad (74)$$

$$b = \sqrt{a^2 - a * E_c} \quad (75)$$

De esta forma se lograba que la cámara enfocara en cada posición de la elipse puntos del objeto, aunque en principio esto solo se garantizaba en el plano donde se ajustaba. Lo novedoso ahora es que este ajuste se va a realizar en dos planos, lo que implica una mejor adaptación de la geometría del objeto y que la dirección de enfoque de la cámara tenga un mejor comportamiento en determinados tipos de objetos. Como se puede adivinar, esta nueva posibilidad se espera que dé solución a los problemas que aparecían con la orientación de la cámara en el caso esférico.

A continuación, se va a realizar el análisis para los tipos de objetos definido con eje de rotación horizontal (eje X), extendiéndose al finalizar los resultados para objetos con eje de rotación vertical.

- **Objetos alargados con eje horizontal**

Este tipo de objetos tienen e_x como la mayor dimensión de su *bounding box*, coincidiendo con el eje de rotación. Por este motivo los elipsoides que se adaptan a esta geometría garantizan que la cámara va a estar enfocada en todo momento a puntos contenidos en el eje de X^1 .

En el plano horizontal ocurre que el semieje mayor de la elipse de traslación coincide el eje de rotación (eje X) y el semieje menor con el eje Z, ver Figura 67b. Sabiendo que la posición inicial de la cámara es $(0, 0, -z_0)$ se concluye que $r_z = z_0$. Asimismo, para lograr que la cámara siempre enfoque puntos del objeto se va a ajustar la cúspide de la evoluta al límite de la *bounding box* del objeto en el eje, esto es, $E_c = e_x$. Con estas dos identidades, el valor de r_x se obtiene calculando el semieje mayor de esa elipse, empleando la expresión (74).

Para buscar el valor de r_y se va a estudiar ahora cómo la elipse de traslación rota en el plano vertical XY, Figura 67c. En este plano la cámara va a continuar mirando hacia el eje X, como se ha visto. Ya se ha ajustado la cúspide de la evoluta a e_x en el plano horizontal, no se puede volver a ajustar. Se busca, sin embargo, ajustar el perfil del elipsoide al perfil del objeto en este plano. Para ello lo que se va a hacer es imponer que la cámara acabe a la misma distancia del objeto que tenía en el plano horizontal. De tal forma que se fuerza a que $r_y = (z_0 - e_z) + e_y$.

¹ Este efecto fue estudiado con anterioridad.

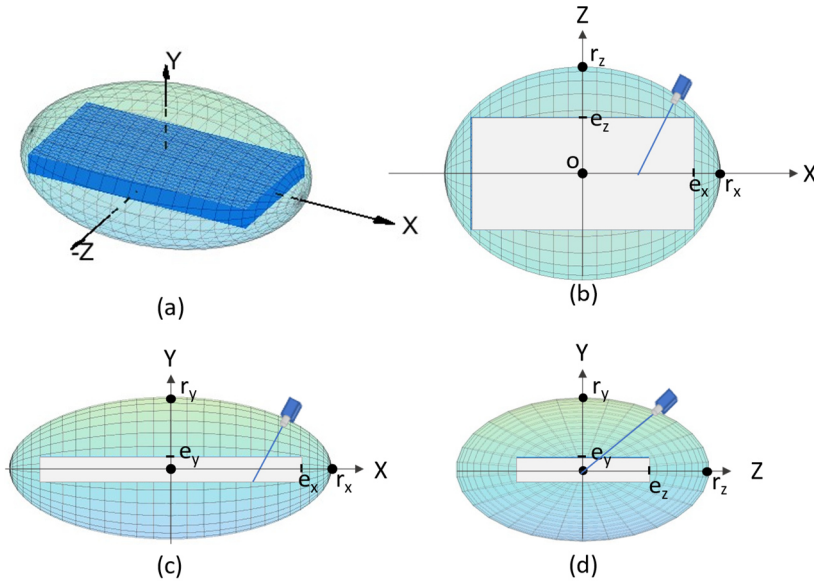


Figura 67. Ejemplo de elipsoide triaxial ajustado a un objeto alargado. En (a) se muestra la situación tridimensional, en (b), (c) y (d) la vista en los planos XZ, YX y YZ respectivamente.

En la expresión (76) se recapitulan todos los resultados obtenidos, válidos para objetos alargados ($e_x > e_y$ y $e_x > e_z$) con eje de rotación horizontal. La elipse de translación en el plano horizontal va a quedar definida por r_x y r_z , mientras que la elipse de rotación en el plano vertical ($z=0$) queda definida por r_y y r_z .

$$E_c = e_x \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_x = \frac{1}{2}(e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_z^2}) \\ r_y = (z_0 - e_z) + e_y \end{cases} \quad \text{con } \begin{cases} e_x > e_y \\ e_x > e_z \end{cases} \quad (76)$$

- **Objetos achatados tipo I con eje horizontal**

En este tipo de objetos ocurre que es la dimensión más pequeña de la *bounding box* del objeto la que coincide con el eje de rotación. Como se vio en el apartado previo el elipsoide que se adapta a este tipo de objetos hará que la cámara este enfocada en todo momento a puntos del plano YZ, perpendicular al eje de rotación. Si se observa la situación en ambos planos extremos, horizontal y vertical, (ver Figura 68) se aprecia que el perfil del objeto cambia en el eje al que enfoca la cámara. El objetivo deseado será que el enfoque de la cámara se mantenga sobre puntos del objeto y no sobre el vacío durante todos los movimientos. Esto se traduce en que debe cambiar el perfil de la elipse de traslación para adaptarse al objeto, cambiando para ello el ajuste que hacemos de la cúspide de la evoluta. Por tanto, va a ser necesario ajustar un valor de E_c para cada uno de los planos.

Analizando el plano horizontal, XZ, se aprecia que el semieje mayor de la elipse de traslación está contenido en el eje Z. Manteniendo el mismo criterio, el valor de r_z se iguala a la posición inicial de la cámara, $r_z = z_0$. Asimismo, igualamos la cúspide de la evoluta en ese plano con e_z , lo que lleva a $E_{cPlano XZ} = e_z$. Finalmente, el valor de r_x se puede obtener calculando el semieje menor de la elipse, empleando la expresión (75), lo que resulta en $r_x = \sqrt{r_z^2 - r_z e_z}$.

Para realizar el ajuste en el plano vertical, ver Figura 68c, primero se ajusta la evoluta de la elipse a las dimensiones del objeto en este plano, de tal forma que $E_{cPlano XY} = e_y$. Y se calcula el valor de r_y , para ello basta con calcular el semieje mayor de esa elipse empleando la expresión (74), lo que da lugar a $r_y = \frac{1}{2}(e_y + \sqrt{e_y^2 + 4r_x^2})$.

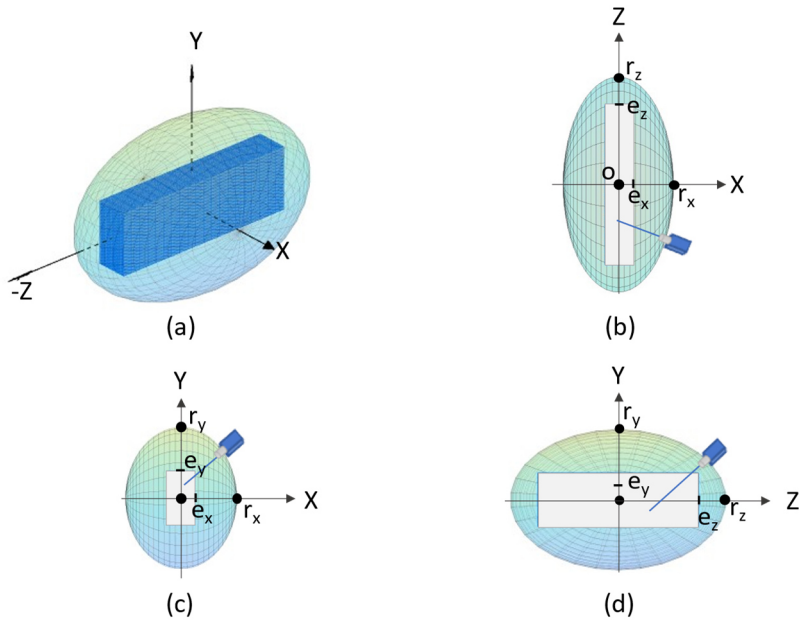


Figura 68. Ejemplo de elipsoide triaxial ajustado a un objeto achatado tipo I. En (a) se muestra la situación tridimensional, en (b), (c) y (d) la vista en los planos XZ, YX y YZ respectivamente.

En la expresión (77) se recapitulan todos los resultados obtenidos, válidos para objetos oblatos de tipo I ($e_x < e_y$ y $e_x < e_z$) con eje de rotación horizontal.

$$\begin{matrix} E_{c_{plano\ XZ}} = e_z \\ E_{c_{plano\ XY}} = e_y \end{matrix} \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_x = \sqrt{r_z^2 - r_z e_z} \\ r_y = \frac{1}{2} \left(e_y + \sqrt{e_y^2 + 4r_x^2} \right) \end{cases} \quad (77)$$

- **Objetos achatados tipo II y eje horizontal**

La geometría de este tipo de objetos es tal que la dimensión intermedia de su *bounding box* es la que coincide con el eje de rotación. Como consecuencia, la cámara, al realizar movimientos longitudinales (rotación), va a ir moviendo su punto de enfoque de puntos sobre el eje

de rotación a puntos en uno de los otros ejes perpendiculares, o viceversa, según el caso. Esto ocurre así porque en uno de los planos el semieje mayor de la elipse estará situado sobre el eje de rotación, pero no en el otro. En esta ocasión, para resolver este caso se va a dividir el problema en dos subtipos de objetos¹.

○ **Objetos que cumplen que $e_z > e_x > e_y$**

Analizando el plano horizontal, XZ, se observa que el semieje mayor de la elipse de traslación está situado sobre el eje Z, la cámara enfocará pues puntos de ese eje, como se ilustra en la Figura 69b. Se ajusta la elipse a la geometría, de nuevo, ajustando la cúspide de la evoluta al objeto, $E_{cPlano XZ} = e_z$. Como antes el valor de r_z se iguala a la posición inicial de la cámara. A partir de esos dos datos el valor de r_x se obtiene calculando el semieje menor de la elipse mediante la expresión (75), lo que resulta en $r_x = \sqrt{r_z^2 - r_z e_z}$.

En el plano vertical ocurre que el semieje mayor de la elipse está ahora sobre el eje de rotación, por tanto, la cámara estará enfocando puntos contenidos en este, ver Figura 69c. Para conseguir obtener el valor de r_y , se ajusta la geometría a las dimensiones del objeto mediante la cúspide de la evoluta, $E_{cPlano XY} = e_x$, y se calcula el semieje menor de esa elipse empleando la misma expresión. La expresión (78) resume todos estos resultados.

$$\begin{aligned} E_{cPlano XZ} &= e_z \\ E_{cPlano XY} &= e_x \end{aligned} \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_x = \sqrt{r_z^2 - r_z e_z} \\ r_y = \sqrt{r_x^2 - r_x e_x} \end{cases} \quad (78)$$

¹ Geométricamente hablando uno es la rotación del otro 90°, aun así, es necesario tratarlos de forma distinta.

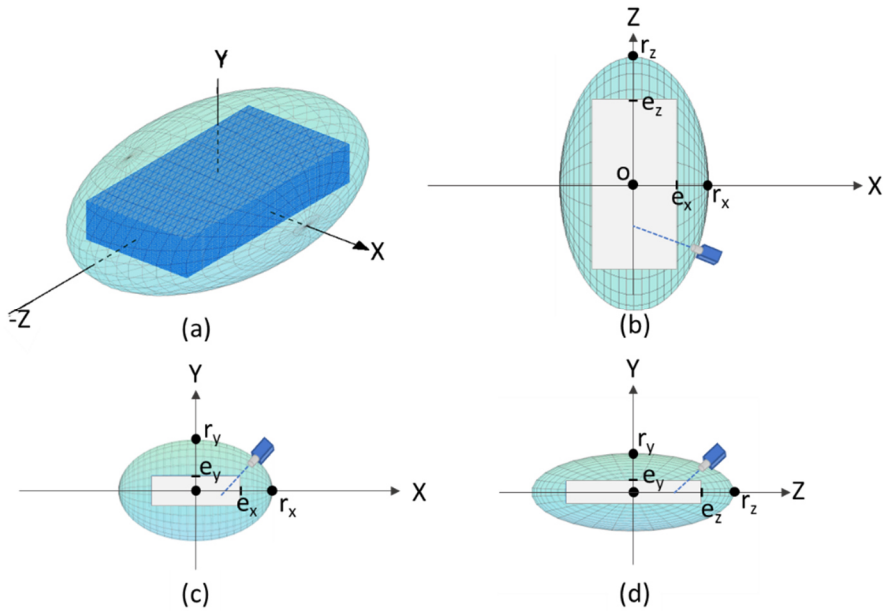


Figura 69. Ejemplo de elipsoide triaxial ajustado a un objeto achatado tipo II con $e_z > e_x > e_y$. En (a) se muestra la situación tridimensional, en (b), (c) y (d) la vista en los planos XZ, YX y YZ respectivamente.

○ **Objetos que cumplen que $e_y > e_x > e_z$**

En esta ocasión en el plano horizontal se observa que el semieje mayor de la elipse de traslación está situado sobre el eje X, la cámara enfocará puntos de ese eje, como se puede observar en la Figura 70b. En consecuencia, la elipse se ajusta a la geometría igualando la cúspide de la evoluta ahora a e_x , $E_{cPlano XZ} = e_x$. Además, el valor de r_z se iguala a la posición inicial de la cámara, $r_z = z_0$. El valor de r_x se obtiene calculando el semieje mayor de la elipse, según la expresión (74), lo que da como resultado $r_x = \frac{1}{2}(e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_z^2})$.

En el plano vertical el semieje mayor de la elipse pasa a estar sobre el eje Y, y la cámara enfocará puntos contenidos de ese eje, ver Figura 70c. Se impone que $E_{cPlano XY} = e_y$ para ajustar el elipsoide a la geometría y se calcula el semieje mayor de la elipse para obtener el valor

de r_y mediante la misma expresión que antes. La expresión (79) resume todos los resultados para los objetos achatados tipo II con eje horizontal y $e_y > e_x > e_z$.

$$\begin{aligned}
 E_{cPlano\ XZ} &= e_x \\
 E_{cPlano\ XY} &= e_y
 \end{aligned}
 \rightarrow
 \begin{cases}
 r_x = \frac{1}{2} \left(e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_z^2} \right) \\
 r_y = \frac{1}{2} \left(e_y + \sqrt{e_y^2 + 4r_x^2} \right)
 \end{cases}
 \quad (79)$$

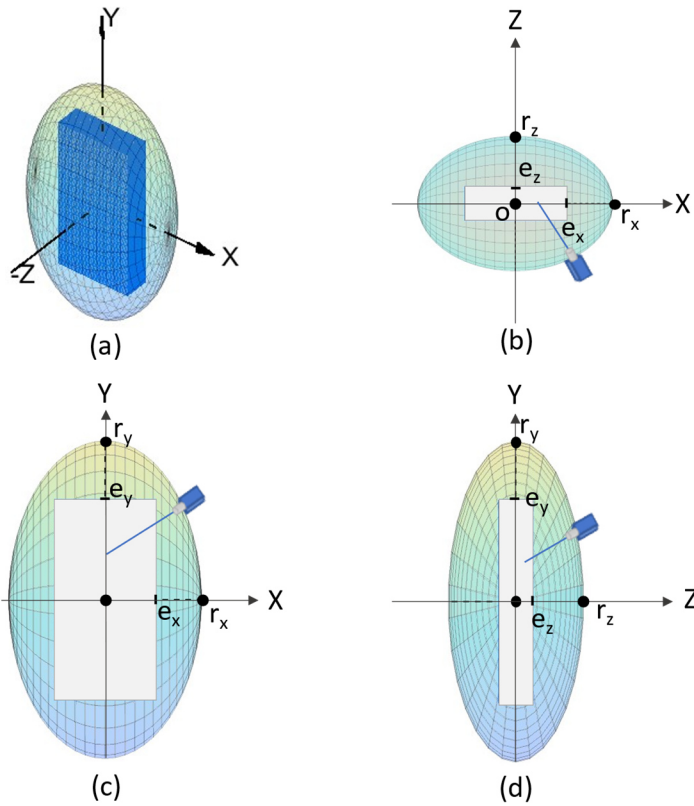


Figura 70. Ejemplo de elipsoide triaxial ajustado a un objeto achatado tipo II con $e_y > e_x > e_z$. En (a) se muestra la situación tridimensional, en (b), (c) y (d) la vista en los planos XZ, YX y YZ respectivamente.

Este análisis puede repetirse para *objetos con un eje de rotación preferido vertical*. En este escenario, la elipse de translación se ubicaría en el plano vertical, y las rotaciones se llevarían a cabo alrededor del eje Y. Los resultados se obtendrían mediante un cambio de variable en las expresiones previamente obtenidas, de modo que se derivarían las ecuaciones siguientes.

Objetos alargados con eje vertical

$$E_c = e_y \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_y = \frac{1}{2}(e_y + \sqrt{e_y^2 + 4r_z^2}) \\ r_x = (z_0 - e_z) + e_x \end{cases} \quad \text{con } \begin{cases} e_y > e_x \\ e_y > e_z \end{cases} \quad (80)$$

Objetos achatados tipo I con eje vertical

$$\begin{cases} E_{cPlano YZ} = e_z \\ E_{cPlano YX} = e_y \end{cases} \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_y = \sqrt{r_z^2 - r_z e_z} \\ r_x = \frac{1}{2}(e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_y^2}) \end{cases} \quad (81)$$

Objetos achatados tipo II y eje vertical

Objetos que cumplen que $e_z > e_x > e_y$

$$\begin{cases} E_{cPlano YZ} = e_z \\ E_{cPlano YX} = e_y \end{cases} \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_y = \sqrt{r_z^2 - r_z e_z} \\ r_x = \sqrt{r_y^2 - r_y e_y} \end{cases} \quad (82)$$

Objetos que cumplen que $e_y > e_x > e_z$

$$\begin{cases} E_{cPlano YZ} = e_y \\ E_{cPlano YX} = e_x \end{cases} \rightarrow \begin{cases} r_z = z_0 \\ r_y = \frac{1}{2}(e_y + \sqrt{e_y^2 + 4r_z^2}) \\ r_x = \frac{1}{2}(e_x + \sqrt{e_x^2 + 4r_y^2}) \end{cases} \quad (83)$$

3.3.1.3 Orientación de la cámara

En esta sección se van a exponer las expresiones que proporcionan el punto al que debe enfocar la cámara en cada punto del elipsoide de navegación y para cada uno de los tipos de objetos/elipsoides que se han descrito.

- **Objetos alargados**

Como ya se ha detallado, en este tipo de elipsoides la cámara enfoca en todo momento puntos del eje de rotación. Sin embargo, a diferencia del caso esferoidal ahora el punto al que mira la cámara cambia durante la rotación. Este se debe a que la elipse de traslación va cambiando según se produce la rotación, ya que en general $r_x \neq r_y$. Esto se expresa en la ecuación del punto al que enfoca la cámara como un valor de la cúspide de la evoluta ($E_{C\theta}$) que cambia durante la rotación, de tal forma que se obtienen las expresiones (84) para el caso de eje de rotación horizontal y la (85) para el caso de eje de rotación vertical.

$$p_{enfoque} = [E_{C\theta} \cos t, 0, 0] \quad t \in [0, 2\pi]$$

$$E_{C\theta} = \sqrt{\left(\left(r_x - \frac{r_y^2}{r_x}\right) * \sin \theta\right)^2 + \left(\left(r_x - \frac{r_z^2}{r_x}\right) * \cos \theta\right)^2} \quad (84)$$

$$p_{enfoque} = [0, E_{C\theta} \cos t, 0] \quad t \in [0, 2\pi]$$

$$E_{C\theta} = \sqrt{\left(\left(r_y - \frac{r_x^2}{r_y}\right) * \sin \theta\right)^2 + \left(\left(r_y - \frac{r_z^2}{r_y}\right) * \cos \theta\right)^2} \quad (85)$$

- **Objetos achatados tipo I**

En este caso, como se ha visto previamente, la cámara estará enfocando puntos contenidos en el plano perpendicular al eje de rotación. Estos puntos describirán una trayectoria elipsoidal en ese plano durante los movimientos de rotación. Se trata de una solución parecida a la obtenida en la navegación esferoidal para esferoides oblatos, aunque entonces la trayectoria era circular. Por desdoblado, durante un movimiento de traslación efectuará el movimiento de travelling acostumbrado siguiendo la forma del objeto. Todo este análisis lleva a las siguientes expresiones para el punto de enfoque de la cámara: (86) para eje de rotación horizontal y (87) para eje de rotación vertical.

$$p_{enfoc} = \left[0, \left(r_y - \frac{r_x^2}{r_y} \right) \sin t \sin \theta, \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t \cos \theta \right] \quad t \in [0, 2\pi] \quad (86)$$

$$p_{enfoc} = \left[\left(r_x - \frac{r_y^2}{r_x} \right) \sin t \cos \theta, 0, \left(r_z - \frac{r_y^2}{r_z} \right) \sin t \sin \theta \right] \quad t \in [0, 2\pi] \quad (87)$$

- **Objetos achatados tipo II**

Este caso es un poco más complicado, ya que se trata del caso particular de la navegación elipsoidal. En él la cámara va a transitar entre enfocar puntos del eje de rotación, a puntos de uno de los otros ejes. Este caso se va a adaptar especialmente a aquellos objetos que causaban problemas en la navegación esferoidal. Se va a mantener la división de este tipo de objetos en dos casos que se realizó en el apartado anterior, ya que cada uno tiene características propias.

- **Objetos que cumplen que $e_z > e_x > e_y$**

Para el ejemplo del eje de rotación horizontal, ocurre que, cuando la cámara se encuentre en el plano XZ, estará enfocando puntos del eje Z, y cuando esté en el plano XY, enfocará puntos del eje de rotación X.

Durante un movimiento de rotación la cámara seguirá una trayectoria elíptica entre esos ejes. Por su parte, durante un movimiento de traslación efectuará el movimiento de travelling acostumbrado. Realizando el análisis se llega a la expresión (88) que determina lo puntos de enfoque para eje de rotación horizontal.

$$p_{enfoc} = \left[\left(r_x - \frac{r_y^2}{r_x} \right) \cos t \sin \theta, 0, \left(r_z - \frac{r_x^2}{r_z} \right) \sin t \cos \theta \right] \quad t \in [0, 2\pi] \quad (88)$$

El mismo análisis se puede llevar a cabo para eje de rotación vertical y se llega a la expresión (89):

$$p_{enfoc} = \left[0, \left(r_y - \frac{r_x^2}{r_y} \right) \cos t \sin \theta, \left(r_z - \frac{r_y^2}{r_z} \right) \sin t \cos \theta \right] \quad t \in [0, 2\pi] \quad (89)$$

○ **Objetos que cumplen que $e_y > e_x > e_z$**

Para el ejemplo del eje de rotación horizontal, ocurre que, cuando la cámara se encuentre en el plano XZ, estará enfocando puntos del eje de rotación (eje X), y cuando esté en el plano XY, enfocará puntos del eje Y. En el movimiento de rotación la cámara sigue una trayectoria elíptica entre estos ejes. Por supuesto, durante un movimiento de traslación efectuará el movimiento de travelling acostumbrado. Realizando el análisis se llega a la expresión (90) que determina los puntos de enfoque para eje de rotación horizontal.

$$p_{enfoc} = \left[\left(r_x - \frac{r_z^2}{r_x} \right) \cos t \cos \theta, 0, \left(r_y - \frac{r_x^2}{r_y} \right) \sin t \sin \theta \right] \quad t \in [0, 2\pi] \quad (90)$$

Para eje de rotación vertical se llegaría a la expresión (91):

$$p_{enfoc} = \left[0, \left(r_y - \frac{r_z^2}{r_y} \right) \cos t \cos \theta, \left(r_x - \frac{r_y^2}{r_x} \right) \sin t \sin \theta \right] \quad t \in [0, 2\pi] \quad (91)$$

3.3.2 Fundamentos de la navegación

Los fundamentos de la navegación esferoidal eran bastante sencillos, a modo de recordatorio: una vez definida la elipse de traslación se mapeaban los movimientos de traslación del dispositivo en cambios del parámetro t de la ecuación paramétrica de la elipse. Mientras que los movimientos de longitud se mapeaban en cambios del grado de rotación del plano que contenía esa elipse de traslación. En estos movimientos de rotación la cámara seguía por tanto un camino circular, cuyo radio era función de la posición de la cámara en la elipse de traslación.

El mecanismo de la navegación elipsoidal va a ser un poco más complejo, ya que ambos movimientos se influyen mutuamente. Para una posición de la cámara se dispone ahora de una elipse de traslación y una de rotación, de tal forma que: los movimientos de la rotación van a ir cambiando la elipse de traslación y los movimientos de traslación cambian la elipse de rotación. El punto de partida es la definición del elipsoide inicial, sección 3.3.1.2, que ajustaba la elipse de traslación en dos posiciones, una en el plano cartesiano XZ y otra en el plano cartesiano XY, definiendo de esta manera, de forma indirecta, una elipse de rotación en el plano cartesiano YZ.

Se va ahora a estudiar cómo cambian las elipses de traslación y de rotación según la posición de la cámara en cada momento. Se nombrarán los semiejes de estas elipses con los sufijos T y R respectivamente. En contraposición con los semiejes del elipsoide virtual definidos previamente a los que a partir de ahora añadiremos el sufijo O. En particular, se va a estudiar en detalle todo este procedimiento para el caso de eje de rotación horizontal.

3.3.2.1 Movimientos de rotación

Partiendo de una posición de la cámara, un movimiento en rotación implica un cambio del ángulo de rotación del plano que contiene la elipse

de traslación. Esta se mueve siguiendo a la elipse de rotación cambiando su forma tal y como se puede apreciar en la Figura 71a. El valor del radio de la elipse situado sobre el eje de rotación, r_x en la figura, no va a cambiar. Sin embargo, el semieje contrario ira cambiando su valor de forma gradual en el rango $[r_{z0}, r_{y0}]^1$, siguiendo la que hemos definido como elipse de rotación, es decir, la elipse sección del elipsoide por el plano perpendicular al eje de rotación. En la Figura 71b se ha ilustrado esta elipse de rotación, en el plano YZ, para el caso de eje de rotación horizontal. Se puede observar como el valor del semieje de la elipse de traslación toma el valor r_{z0} cuando la rotación es 0 grados y r_{y0} cuando es 90 grados.

Para obtener el valor de este semieje para cada ángulo de rotación basta con calcular la distancia al origen del punto sobre la elipse de rotación. El resultado, que es función del ángulo de rotación y de los radios del elipsoide y puede verse en la expresión (92), para el caso de eje de rotación horizontal, y en la (93), para el de eje vertical. En ambas expresiones se han usado los subíndices O para referirnos a los radios del elipsoide virtual y T para los radios de la elipse de traslación.

$$\begin{cases} r_{zT} = \frac{r_{z0} \cdot r_{y0}}{\sqrt{(r_{z0} \operatorname{sen}(\theta))^2 + (r_{y0} \operatorname{cos}(\theta))^2}} \\ r_{xT} = r_{x0} \end{cases} \quad (92)$$

$$\begin{cases} r_{zT} = \frac{r_{z0} \cdot r_{x0}}{\sqrt{(r_{z0} \operatorname{sen}(\theta))^2 + (r_{x0} \operatorname{cos}(\theta))^2}} \\ r_{yT} = r_{y0} \end{cases} \quad (93)$$

¹ r_{z0} , r_{y0} son los radios del elipsoide a los que se les ha añadido el sufijo O con intención de ser más precisos.

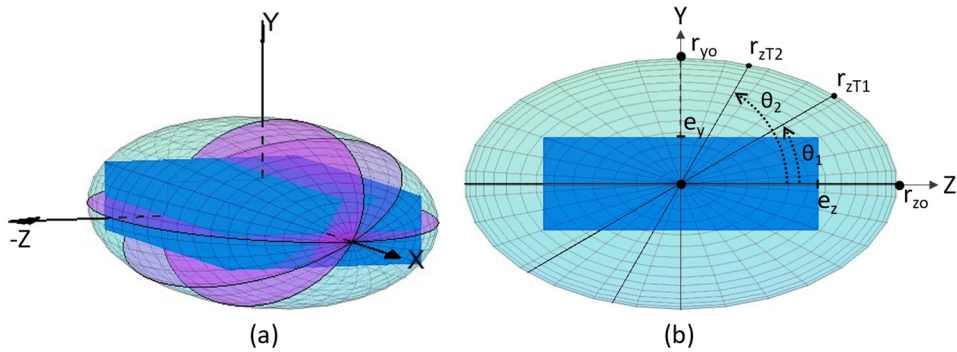


Figura 71. En la figura se ilustra como cambia la elipse de translación tras el movimiento de rotación, para un ejemplo con eje de rotación horizontal. En (a) se muestra una perspectiva general y en (b) se muestra la elipse de rotación. Se muestran dos posibles rotaciones, de 30° y 60° respectivamente.

3.3.2.2 Movimientos de translación

Un movimiento de translación implica un cambio del parámetro t de la ecuación paramétrica de la elipse de translación, lo que proporcionará la nueva posición de la cámara. Esta nueva posición hace necesario calcular una nueva elipse de rotación, sobre la que se moverá la cámara en el siguiente movimiento de rotación. Para calcular la nueva elipse de rotación se hace uso de las ecuaciones paramétricas de la elipse y del nuevo valor de t , lo que da lugar a la expresión (94) para el caso de *eje horizontal* y (95) para el caso de *eje de rotación vertical*. En ambas se han usado los subíndices O para referirnos a los radios del elipsoide virtual y R para los radios de la elipse de rotación. En la Figura 72 se ha ilustrado un ejemplo con eje de rotación horizontal.

$$\begin{cases} r_{zR} = |r_{zo} \text{sen}(t)| \\ r_{yR} = |r_{yo} \text{sen}(t)| \end{cases} \quad (94)$$

$$\begin{cases} r_{zR} = |r_{z0} \text{sen}(t)| \\ r_{xR} = |r_{x0} \text{sen}(t)| \end{cases} \quad (95)$$

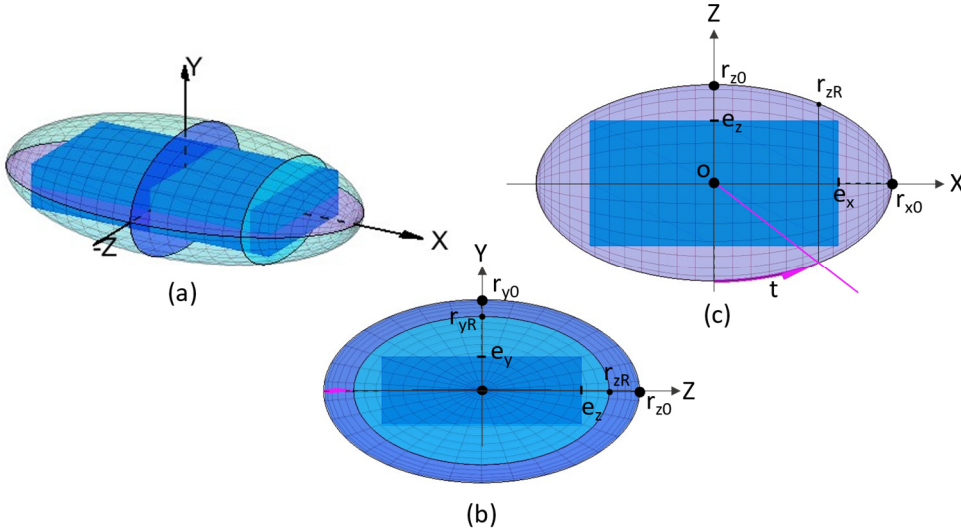


Figura 72. Ejemplo de cambio en la elipse de rotación tras un movimiento en latitud, para un ejemplo con eje de rotación horizontal. En (a) se muestra una perspectiva general, en (b) se muestra una vista lateral que permite ver el cambio de la elipse de rotación y en (c) se muestra la elipse se translación sobre el plano XZ sobre la que se realizan el cálculo de la nueva elipse de rotación.

3.3.2.3 Movimientos radiales

Los movimientos radiales se mapean sobre el valor radio del elipsoide situado en el eje Z. En consecuencia, un movimiento radial implica calcular un nuevo elipsoide de navegación, a partir del cual se calculan las nuevas elipses de traslación y rotación de la cámara. Estas últimas con los datos de t y el ángulo de rotación Θ .

3.3.3 Cálculos dinámicos de la posición de la cámara.

El objetivo de esta sección es estudiar cómo realizar el mapeo entre los gestos del dispositivo y los movimientos de la cámara. Por suerte el análisis es prácticamente idéntico al realizado en la sección 3.2.3 para la navegación basada en esferoides, por lo que aquí nos vamos a limitar a rescatar las expresiones actualizadas.

En la navegación esferoidal se vio cómo mapear los gestos del dispositivo en cambios de latitud, longitud y radio. Cuando se realiza este análisis para la navegación elipsoidal no aparecen casi diferencias, ni en los movimientos en latitud ni en los radiales. Sí aparece un cambio sustancial en el caso de los movimientos en longitud, ya que ahora la cámara recorre un camino elíptico y no circular. Es decir, el problema de mapear los cambios en longitud es ahora igual al de mapear los cambios en latitud, salvo que ocurren en otro plano. En resumen, las expresiones que traducen los gestos del dispositivo en cambios de latitud y longitud son las obtenidas en la sección 3.2.3.1 *Cambios en latitud* de la navegación esferoidal. En concreto se va a emplear la solución basada en la proporción del objeto en la pantalla. Se pasa ahora a mostrar las expresiones que se obtendrían tras todo este análisis, para el caso de eje de rotación horizontal.

3.3.3.1 Cambios en latitud

Para solucionar el mapeo de los movimientos en latitud en el caso esferoidal se definía como referencia para la interacción un esferoide (elipsoide de revolución) imaginario inscrito dentro de la *bounding box* del objeto, recordar Figura 43a. Es en este punto donde va a aparecer una segunda diferencia para este caso de la navegación elipsoidal. Para la navegación elipsoidal el elipsoide inscrito que se va a emplear como referencia va a ser también triaxial. Se busca de esta forma una mejor adaptación de la interacción a la geometría del objeto. En otras palabras,

en el caso esférico se empleaba un corte horizontal de la *bounding box* que daba lugar a una elipse inscrita, que era siempre la misma. Sin embargo, ahora la elipse inscrita se calcula según el plano de corte, con la *bounding box*, correspondiente al grado de rotación que tenga la cámara en cada instante, ver Figura 73. Aunque ahora el ajuste a la forma del objeto es mejor que antes, no es perfecto, lo será más cuanto más se parezca a la forma del objeto de un elipsoide.

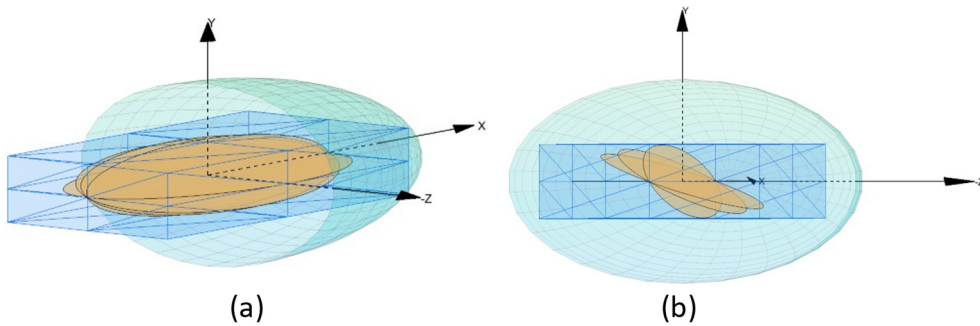


Figura 73. Ilustración de varias elipses inscritas, en la *bounding box* del objeto, en función de la rotación de la cámara desde dos perspectivas distintas. El ajuste será mejor cuanto parecida se la forma del objeto a un elipsoide.

Finalmente, el resultado para todos los tipos de objetos con eje horizontal es el conjunto de expresiones (96), que van a mapear los movimientos del ratón en el eje \tilde{x} de la pantalla en cambios del parámetro t en la ecuación paramétrica que rige la posición de la cámara sobre la elipse de traslación.

3.3.3.2 Cambios en longitud

Para los movimientos en longitud se emplea también la figura del elipsoide triaxial de referencia inscrito dentro de la *bounding box* del objeto. En este caso lo relevante para el mapeo será el corte vertical de ese elipsoide, lo que da lugar a una elipse inscrita al objeto en el plano YZ. Como se puede apreciar este caso es más sencillo, al ser la elipse de rotación siempre perpendicular al plano horizontal. De tal forma que se llega al conjunto de expresiones (97), que son válidas para los tipos de objetos que se han definido, en el caso de eje de rotación horizontal. Estas expresiones mapean los movimientos del ratón en el eje \tilde{y} de la pantalla en cambios del ángulo de rotación Θ de la cámara.

$$\Delta\theta = \sqrt{\frac{(x - x')^2 + (z - z')^2}{(a_{ei} \sin t_0)^2 + (b_{ei} \cos t_0)^2}} * \frac{2 \tan \beta}{SH \text{ in pixels}} * \Delta\tilde{y}$$

donde

- La elipse inscrita es: $\begin{cases} a_{ei} = \max[e_y, e_z] \\ b_{ei} = \min[e_y, e_z] \end{cases}$
- El punto de corte entre la elipse inscrita y la \perp a la elipse de rotación de la cámara:

$$p' = \begin{cases} x' = \frac{a_{ei}^2 \cdot m_{t_0} \cdot D \pm a_{ei} \cdot b_{ei} \sqrt{b_{ei}^2 - D^2 + a_{ei}^2 \cdot m_{t_0}^2}}{[b_{ei}^2 + a_{ei}^2 \cdot m_{t_0}^2]} \\ z' = \pm b_{ei} \sqrt{1 - \frac{x'^2}{a_{ei}^2}} \end{cases} \quad (97)$$

donde

- La pendiente de la \perp a la elipse de rotación de la cámara:

$$\begin{cases} m_{t_0} = \frac{a_R}{b_R} \tan t_0 \\ D = (a_R^2 - b_R^2) \frac{1}{b_R} \sin t_0 \end{cases}$$

- La elipse de rotación de la cámara es:

$$\begin{cases} a_R = \max[r_{y_R}, r_{z_R}] \\ b_R = \min[r_{y_R}, r_{z_R}] \end{cases}$$

3.3.3.3 Cambios en el radio

Los movimientos radiales, alejar o acercar la cámara al objeto 3D, se consiguen mapeando los gestos del dispositivo en variaciones del radio

en el eje Z del elipsoide de navegación. El estudio que se lleva a cabo en la sección 3.2.3.3 *Cambios en el radio* para la navegación esferoidal es totalmente valido aquí, por lo que las expresiones son las mismas que se obtuvieron en ese caso.

3.4 Evaluación

3.4.1 Introducción

El objetivo de este estudio es comparar en términos de usabilidad un sistema de navegación basado en esferoides (como el diseñado en este capítulo) frente a un sistema de navegación clásico basado en un virtual *trackball* esférico, más concretamente un TAV. Con este motivo se diseñó un experimento en el que los participantes tenían que completar una serie de tareas de inspección y *docking* (acoplamiento). Esto es, los participantes tenían que encontrar un objetivo y alinearlo con una mirilla.

En esta ocasión el objeto empleado fue un modelo 3D con una muy baja esfericidad, en concreto, tenía una forma muy alargada en el eje horizontal. Este objeto sugiere claramente a los usuarios un eje de rotación horizontal, que coincide con su dimensión más larga. El estudio pretende demostrar que en este tipo de objetos la técnica del *trackball* esferoidal beneficiará la usabilidad de la aplicación. Para ello el estudio busca diferencias en el rendimiento, la usabilidad y la carga de trabajo percibidas al utilizar las distintas técnicas de rotación 3D.

Para poder llevar a cabo este estudio se desarrolló un sistema que permitía cambiar entre un sistema de navegación TAV con eje fijo y uno basado en el *trackball* esferoidal.

3.4.2 Hipótesis

Nuestra hipótesis es que en objetos con baja esfericidad la técnica del *trackball* esferoidal beneficiará a la usabilidad general del sistema, al adaptarse a la geometría de los objetos teniendo en cuenta el eje de rotación intrínseco del mismo. Esta mejora de usabilidad de reflejará en términos de:

1. Mayor rendimiento (menos tiempo para completar la tarea)
2. Mayor usabilidad percibida
3. Menor carga de trabajo percibida.

3.4.3 Material y métodos

3.4.3.1 Diseño de la tarea

Cada uno de los participantes tenía que completar una tarea combinada de inspección y *docking* (acoplamiento) varias veces sobre el mismo objeto virtual, llamamos *trials* a cada una de estas repeticiones. El objeto empleado fue el modelo 3D de una turbina de gas, sin ningún tipo de texturas. El objeto tenía una forma alargada y suficiente detalle tridimensional como para ocultar al observador una pequeña esfera amarilla (*target*) en función de la orientación de la cámara. El objetivo para los sujetos era, por tanto, 1) encontrar la esfera amarilla y 2) acoplarla dentro de una mirilla. Esta mirilla estaba formada por dos círculos concéntricos de color rojo sobre el plano de la pantalla, ver Figura 74.

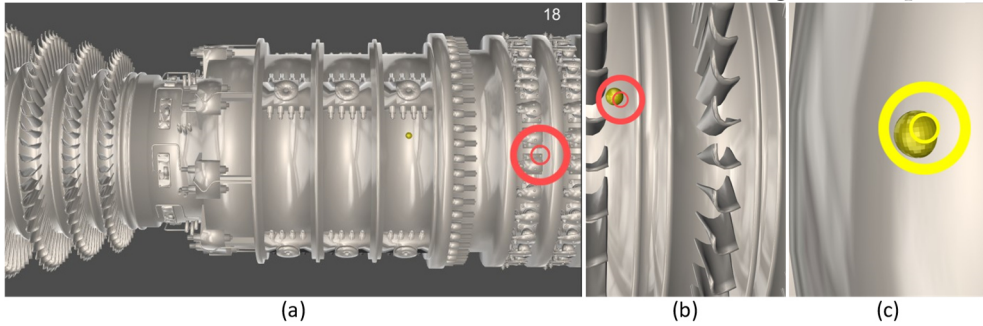


Figura 74. (a) muestra el modelo 3D de la turbina de gas sin textura con una esfera amarilla (objetivo) y el visor en forma de anillo. (b), (c) muestran un instante anterior y posterior a que el objetivo se introduzca en la mirilla.

El acoplamiento se completa cuando la proyección de la esfera amarilla, en la vista de la cámara, se encuentra en el área en forma de anillo, quedando dentro del círculo exterior y siendo mayor que el círculo interior, Figura 74c. Una vez completado, el visor cambiaba de color durante un segundo (Figura 74b y c) y la aplicación emitía un sonido indicando que la tarea se ha realizado correctamente. Para pasar al siguiente *trial*, el sujeto debía pulsar la barra espaciadora. Todo esto se repetía un total de 18 veces. Un contador decreciente ayudaba al usuario a saber cuántas repeticiones quedan para terminar.

A lo largo de los *trials*, la esfera amarilla iba apareciendo en distintas ubicaciones en el objeto. A su vez, la mirilla cambiaba también su posición y tamaño sobre el plano de la pantalla. En ambos casos estas posiciones (y tamaños) estaban predefinidas manualmente. En las próximas secciones se ofrecen más detalles.

3.4.3.2 Material

El experimento se llevó a cabo en una habitación cerrada y mediante un ordenador portátil Lenovo Legion Y530-15ICH con procesador Intel i5 CPU and 16GB RAM con Windows 10. El software usado fue desarrollado in Unity3D e integra HOM3R, un Visor 3D para modelos de productos jerárquicos complejos desarrollado a lo largo del trabajo de

esta Tesis. La aplicación se ejecutaba a pantalla completa en una pantalla de 15,6 pulgadas con una resolución de 1920 x 1080 píxeles. La aplicación se manejaba con un ratón y la barra espaciadora. Tanto el ordenador como el ratón descansaban sobre un escritorio. El uso de la barra espaciadora se limitaba a indicar el inicio de cada uno de los *trials*.

El sistema permitía tres tipos de gestos distintos con el ratón: (1) acercar o alejar el objeto mediante la rueda del ratón. Se fijaron límites en ambos extremos, para evitar que el usuario pudiese perder por completo el objeto de vista. (2) La rotación alrededor de los ejes X e Y, que se accionaba manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón y moviendo el ratón. (3) La traslación del objeto o navegación *pan*, que se accionaba manteniendo pulsado el botón central del ratón (la rueda) a la vez que se movía el ratón. Esta última opción solo era posible en una de las condiciones experimentales, como se explica más adelante.

El hecho de que la mirilla pudiera aparecer en cualquier lugar de la pantalla y con distintos tamaños, Figura 75, forzaba a que los participantes tuviesen que emplear todos los gestos de interacción disponibles para lograr completar la tarea.

3.4.3.3 Participantes

Participaron en este estudio un total de 32 participantes, de los cuales 20 eran hombres, 11 mujeres y una persona que afirmaba ser de género no binario. Sus edades se distribuían entre los 18 y los 49 años ($M=24.16$, $SD=3.65$). Ninguno de los participantes informó de ninguna deficiencia visual no corregida. No se ofreció incentivo económico alguno, pero al terminar se les regaló un pequeño objeto/juguete impreso mediante impresora 3D.

No era necesaria experiencia en el uso de software de modelado 3D o similar. Sin embargo, el 68.75% de los participantes afirmaron tener algo o mucha experiencia en el uso de software de modelado 3D. Mientras que, el 78% afirmaron tener experiencia en el uso de videojuegos.

Los participantes rellenaron y firmaron una hoja de consentimiento informado antes de comenzar el experimento, estando todos los procedimientos fueron revisados y aprobados por el Comité Ético de Experimentación de la Universidad de Málaga, ver Anexo A.2.

3.4.3.4 Diseño Experimental

El experimento fue diseñado con dos variables independientes. La primera de ellas es el sistema de navegación a emplear, se trata de una variable intra-sujeto (*within-subject*) con dos condiciones experimentales. La primera de ellas (condición 1) emplea la navegación basada en esferoides, presentada en esta tesis y la segunda (condición 2) una navegación basada en el tradicional de *trackball* esférico. En la navegación basada en esferoides los participantes podían utilizar los gestos de interacción que permitían realizar rotaciones alrededor de los ejes X e Y, así como, los de acercarse y alejarse del objeto. Sin embargo, en la navegación esféricas los sujetos podrían además hacer uso de la navegación pan, que permitía hacer translaciones del objeto en los ejes X e Y. Cada uno de los participantes realizó el estudio dos veces con cada condición experimental, en un orden contrabalanceado.

La segunda variable experimental es la zona en que se ubican los *targets* en la superficie del objeto: los objetivos se dispusieron para ocupar uniformemente tres tipos de ubicaciones en la superficie del objeto. A partir de una posición inicialmente centrada, posición neutra de la cámara virtual, clasificamos cada zona de la superficie del objeto en tres categorías: (1) Central: los *targets* son visibles y están centrados en el objeto, (2) Lateral-visible: los *targets* son visibles, pero están situados hacia un lado del objeto, y (3) Lateral-oculta, los *targets* están situados hacia un lado del objeto y ocultos por partes de este. El objeto tiene suficiente detalle en esta zona para ocultar el objetivo, a menos que la cámara orbite o se desplace hacia él. En la Figura 75c, d y b se intenta ilustrar esta clasificación con ejemplos.

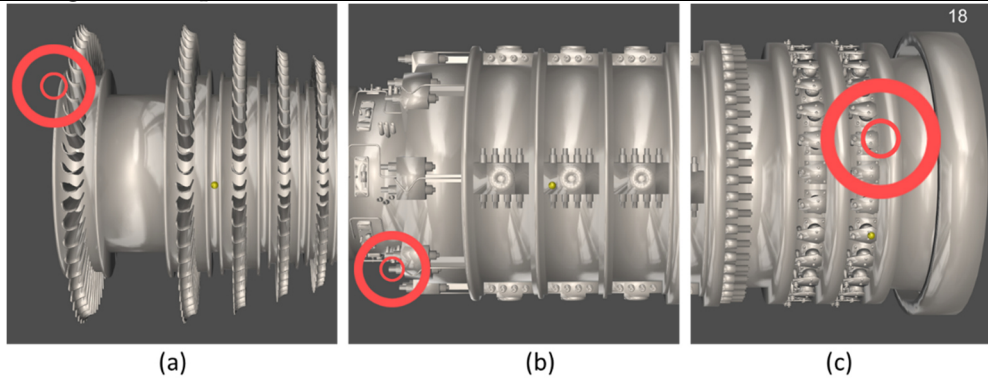


Figura 75. Ejemplos de las tres zonas en las que puede aparecer el objetivo. De izquierda a derecha, (a) lateral-oculta, (b) central y (c) lateral-visible. En la figura también ilustra cómo el visor cambia de posición y tamaño entre los ensayos.

Los *targets* se dispusieron de modo que, al inicio de cada *trial*, el *target* estuviese oculto y en una zona diferente según la clasificación anterior. Esta estrategia garantizaba que los participantes siempre tuvieran que desplazar la cámara alrededor del objeto para encontrar el siguiente objetivo. Se diseñaron manualmente cuatro secuencias para cumplir estas restricciones y en cada bloque se utilizaba una de ellas, tal y como se muestra en la Figura 76c. La correspondencia entre bloque y secuencia también se contrabalanceó mediante cuadrados latinos, para todos los participantes.

3.4.3.5 Procedimiento

Todos los participantes pasaban por las mismas condiciones experimentales. La Figura 76a muestra la estructura completa del experimento para cada participante. Una vez cumplimentados el consentimiento informado y el cuestionario demográfico, los participantes debían completar cuatro bloques, dos por cada condición. La condición de cada bloque se seleccionaba según un orden contrabalanceado mediante cuadrados latinos. Los participantes no recibieron explicaciones ni demostraciones de las técnicas de navegación

que iban a emplear. Solo se les dijo que iban a probar cuatro variantes de una técnica de manipulación de objetos tridimensionales y se les explico la tarea que debían realizar.

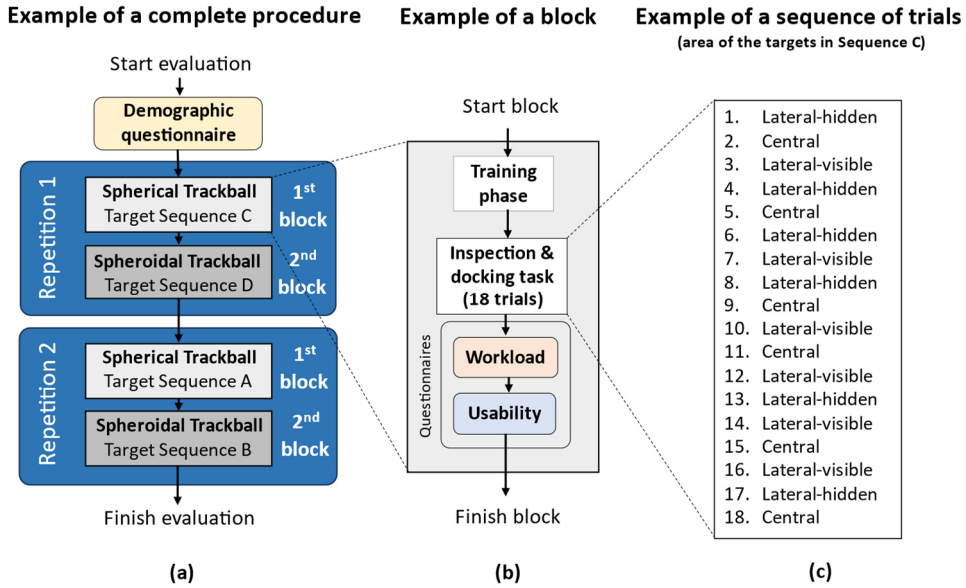


Figura 76. Diseño experimental. (a) muestra el procedimiento completo del experimento. (b) muestra el procedimiento de un bloque y (c) muestra una secuencia de *targets*. Se muestran las condiciones y el orden de las secuencias de un participante como ejemplo.

El procedimiento de cada bloque se ilustra en la Figura 76b. Durante todo el bloque se empleaba la técnica de navegación asignada. El bloque comenzaba con una fase de entrenamiento, en la que los participantes podían practicar la tarea de inspección y *docking*, todo el tiempo que necesitaran, para familiarizarse con la técnica de navegación. Durante esta fase, en la pantalla aparecía la palabra “*Training*” y no se mostraba el contador de cuenta atrás, Figura 77a. Una vez que los participantes consideraban que estaban preparados, hacían clic en un botón de fin del entrenamiento situado en la esquina inferior derecha de la pantalla.

Se cargaba entonces el escenario de la Figura 77b y comenzaban los 18 *trials* de inspección y *docking*. Para comenzar cada *trial* el participante



debía pulsar la tecla espacio. El software seleccionaba la localización de los *targets* para cada trial siguiendo la estrategia previamente descrita. Se les pidió a los participantes que completaran cada uno de estos *trials* lo más rápido posible. Al final del bloque y tras finalizar los 18 *trials*, los participantes rellenaban cuestionarios de usabilidad y carga de trabajo relativos a la técnica de navegación utilizada, Figura 77c.

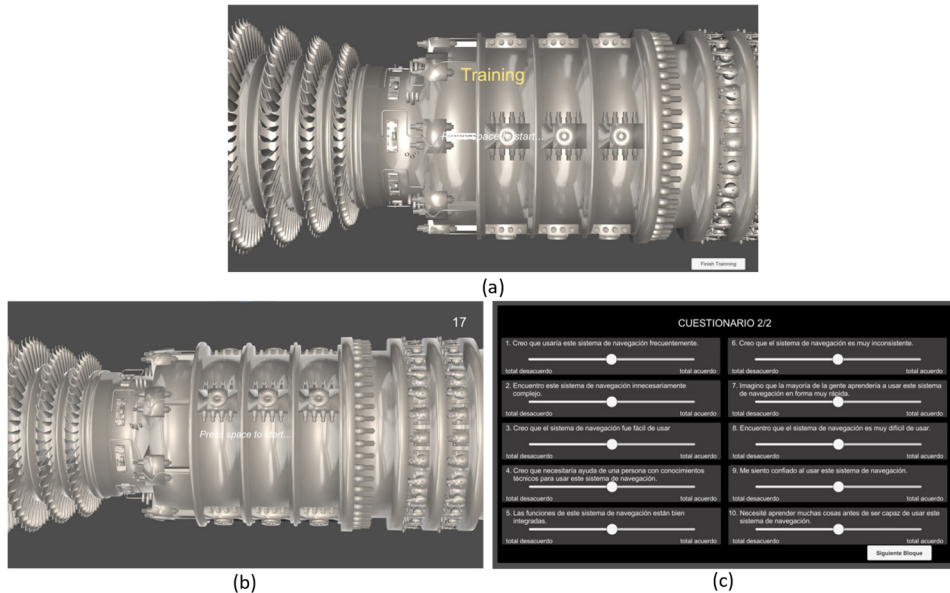


Figura 77. Etapas del procedimiento de la evaluación. En (a) pantalla para iniciar el entrenamiento, en esta etapa los usuarios pueden entrenarse con la aplicación el tiempo que deseen. En (b) fase inicial de un trial, esperando la pulsación de la barra espaciadora. En (c) pantalla de los cuestionarios, que es presentada a los usuarios una vez finalizado cada bloque.

3.4.4 Recogida y análisis de datos

Con el objeto de comparar la usabilidad de ambas técnicas de navegación se recogieron datos que permitieron medir el rendimiento de la tarea, la usabilidad y la carga de trabajo percibida por los participantes. En términos de rendimiento, para cada trial de cada

participante se contabilizaba el tiempo que empleaban los participantes en encontrar y alinear el objetivo dentro de la mirilla con forma de anillo. El instante de inicio de esta media era el momento en que los participantes iniciaban el trial pulsando la tecla espacio. De esta forma, por cada participante y cada condición se recogían un total de 36 medidas, lo que hace un total de 72 medidas de rendimiento por participante, y un total acumulado de 2304 medidas de rendimiento en todo el experimento.

Con estos datos se calcularon cuatro promedios por cada participante y cada condición experimental. Un promedio general de los 36 *trials* de cada condición experimental y un promedio por cada zona y cada condición, 12 *trials* cada una. Para obtener estos promedios se empleó la metodología ya empleada en la sección 2.4.5, presentada por (Sauro & Lewis, 2010)), que corrige las posibles asimetrías positivas de los datos. Esto es, para obtener las medias geométricas de los tiempos de cada *trial* se les aplicó una transformación logarítmica a las mediciones de tiempo, se calculó la media aritmética de dicho logaritmo y se finalmente exponenció el resultado para obtener la media geométrica.

Para medir la usabilidad percibida se usó de nuevo un cuestionario SUS (Brooke, 1996b) de diez ítems traducido al español por (Devin, s. f.). Los participantes rellenaron un cuestionario de usabilidad al final de cada bloque, ver Figura 77c, por tanto, dos cuestionarios por cada condición de la variable experimental *sistema de navegación*. En estos cuestionarios se puntuaba cada pregunta utilizando una escala Likert de 5 puntos que iba de 1 (*totalmente en desacuerdo*) a 5 (*totalmente de acuerdo*). Las respuestas a estos diez ítems se evaluaron para obtener una puntuación SUS (Sauro, 2011), que se promedió para cada condición experimental y participante. Esta medida nos sirve como resumen de la percepción de la usabilidad por parte del sujeto a cada una de las condiciones.

De igual forma al final de cada bloque los participantes rellenaban un cuestionario para medir la carga de trabajo percibida. Se empleó, de

nuevo, el cuestionario Raw TLX (RTLX), que como ya se vio en la sección 2.4.5 es una modificación del NASA-TLX muy sencilla de utilizar (Hart, 2006). En concreto se utilizó la traducción al español propuesta por de Arquer & Nogareda (2001). Este cuestionario consta de seis preguntas que se evalúan utilizando una escala de 21 puntos que va de 0 (*muy bajo*) a 20 (*muy alto*). Con estas respuestas se calculó una puntuación RTLX por cada cuestionario que posteriormente se promediaron para obtener una puntuación RTLX para cada participante y condición.

Se calculó un ANOVA de dos factores intra-sujeto, en el que los dos factores eran la técnica de navegación (esférica o esferoide) y la posición del objetivo (central, lateral-visible y lateral-oculta) para evaluar si existía un efecto en el rendimiento de las técnicas de navegación en función de si el *target* era más difícil de buscar y atracar. Además, se calculó una prueba T de *Student* para evaluar el efecto del rendimiento de la técnica de navegación en cada una de las zonas del objeto por separado. Para evaluar si había diferencias estadísticamente significativas en la usabilidad y la carga de trabajo percibidas por los participantes, se emplearon también pruebas T de muestras pareadas entre ambas condiciones de la técnica de navegación (esférica o esferoide). Se emplearon también técnicas de estimación basadas en el tamaño del efecto y los intervalos de confianza (IC) para informar detalladamente de los resultados, como recomiendan (Cumming, 2014) y la APA (VandenBos, 2009b).

3.4.5 Resultados

3.4.5.1 Rendimiento

La estimación de rendimiento se realizó midiendo el tiempo que los participantes tardaron en completar la tarea de búsqueda y *docking*,

detallada en las secciones previas. Se encontró un efecto significativo en la medida de rendimiento de la tarea cuando se comparan las técnicas de navegación, basada en esferoides frente a basada en esferas. Para la navegación basada en esferoides se obtuvo una media de $8.91s^{+0.471}_{-0.44}$, mientras que para las esféricas se obtuvo $14.25s^{+0.923}_{-0.85}$. La diferencia media estimada entre ambas técnicas fue de $5.34s^{+0.78}_{-0.72}$. (Figure 78, leyenda *All*). Lo que demuestra que, en las condiciones del experimento, el tiempo es inferior cuando se usa la navegación basada en esferoides.

El ANOVA muestra un efecto de la técnica de navegación ($F(1, 31) = 292,586, p < 0,001$). También se observó un efecto de la posición de los *targets* ($F(2, 62) = 97,408, p < 0,001$) y un efecto de interacción entre la posición y la técnica de navegación ($F(2, 62) = 11,721, p < 0,001$).

Se realizaron entonces pruebas *t de Student* separadas para evaluar el efecto del rendimiento de la técnica de navegación en cada una de las zonas del objeto. Se encontraron efectos en todas las zonas:

- Central: La prueba *t de Student* resulto en ($t(31) = -10.251, p < 0.001$). Con un tiempo promedio para esta zona de $7.8s^{+0.46}_{-0.43}$ para la navegación esferoidal y $11.34s^{+0.88}_{-0.81}$ para la navegación con esferas
- Lateral-visible: El resultado de la prueba *t de Student* fue de ($t(31) = -14.590, p < 0.001$). Se obtuvieron unos tiempos promedios para completar la tarea de $9.5s^{+0.82}_{-0.48}$ para la navegación esferoidal, y $15.07s^{+1.07}_{-1.01}$ para la navegación esférica.
- Lateral-oculta: La prueba *t de student* dio como resultado ($t(31) = -14.263, p < 0.001$). Con un tiempo medio para la navegación esferoidal de $9.54s^{+0.66}_{-1.32}$ y $16.92s^{+1.31}_{-1.22}$ para la navegación basada en esferas.

¹ Un valor menor corresponde a un mejor rendimiento. Todos los intervalos de confianza (IC) son al 95%.

En la Figure 78 se han mostrado todos los tiempos promedio obtenidos, así como sus intervalos de confianza, separados para cada área del objeto.

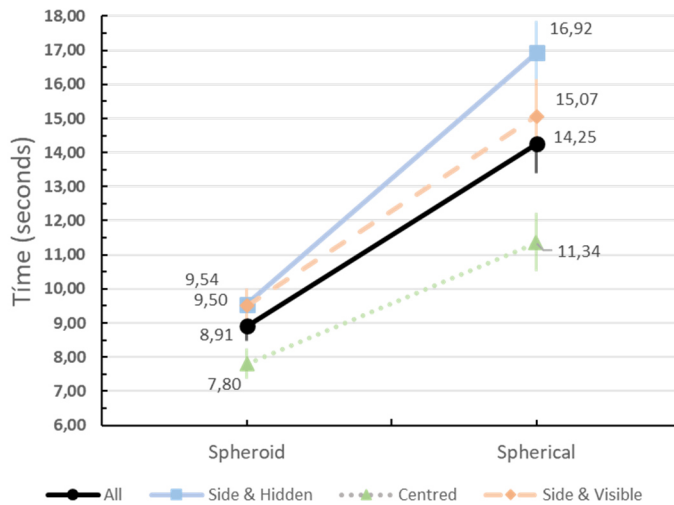


Figure 78. Medias estimadas e IC del tiempo que tardaron los participantes en completar la tarea de inspección y acoplamiento. El eje horizontal representa la técnica de navegación. para cada una de las áreas del objeto. Todas las barras de error son IC del 95%.

3.4.5.2 Usabilidad y carga de trabajo percibida

Para la usabilidad percibida se analizaron las puntuaciones SUS promediadas por sistema de navegación. Tras aplicar el análisis *t de Student* se encontró un efecto significativo sobre la usabilidad percibida, ($t(31) = 8.486, p < 0.001$) en favor de la navegación esferoidal. Se obtuvo una puntuación promedio para la condición de navegación basada en esferoides de $83.79s^{+3.68}_{-3.68}$, mientras que para la navegación esférica se obtuvo un promedio de $69.49^{+4.3}_{-4.3}$, ver Figure 79.

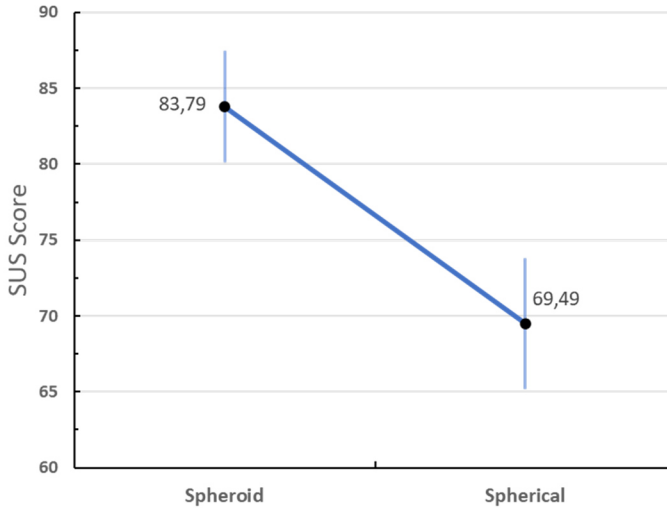


Figure 79. Promedios e IC de las puntuaciones de usabilidad de cada técnica de navegación. Una mayor puntuación en la prueba SUS indica una mejor usabilidad percibida. Todas las barras de error son IC del 95%.

En la carga de trabajo percibida, analizando las puntuaciones RTLX para cada participante y sistema de navegación, se encontró que el sistema de navegación tiene un efecto significativo ($t(31) = -6.631$, $p < 0.001$) en favor de nuevo de la navegación esférica. Cuando se usaba la navegación basada en esferoides la carga de trabajo media reportada por los participantes fue de $29.56^{+4.3}_{-4.3}$. Sin embargo, en la navegación basada en esferas se obtuvo una media de $41.56^{+5.66}_{-5.66}$, ver Figure 80.

¹ En este caso menos es mejor

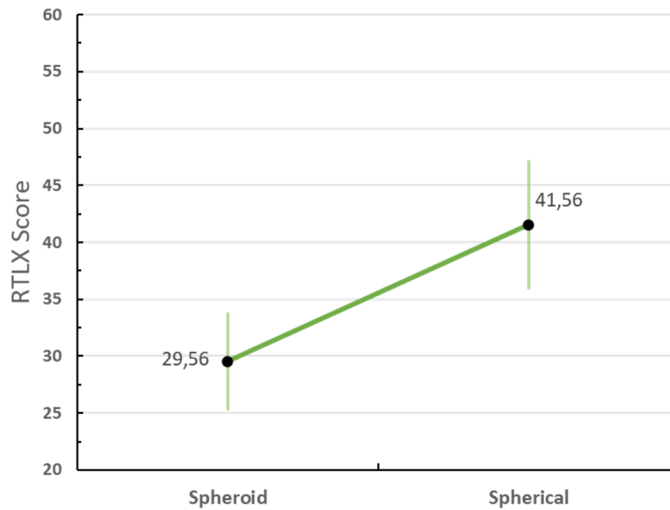


Figure 80. Carga de trabajo percibida en promedio e IC de los puntos obtenidos en el cuestionario Raw TLX (menos es mejor) para cada técnica. Todas las barras de error son IC del 95%.

3.4.6 Discusión

Para evaluar la navegación propuesta se ha usado un objeto virtual que representa una turbina de gas. Este objeto es alargado y tiene un eje intrínseco horizontal, lo que permite poner de manifiesto la potencial ganancia de la técnica propuesta. La técnica de navegación ajusta un esferoide oblongo con eje de rotación horizontal a la geometría el objeto. Como se ha demostrado en el capítulo 2 de esta tesis, (Gonzalez-Toledo et al., 2022a), si una técnica de navegación de eje fijo se ajusta al eje de rotación de los objetos, en el modelo mental del usuario, proporciona una interacción más natural y eficaz.

En este caso la navegación esfeoridal permite acceder a las distintas partes del objeto únicamente orbitando alrededor del mismo, manteniendo una distancia al objeto más constante que con la *trackball* esférica clásica, al adaptarse el esferoide a su forma. En esta última (*trackball* esférica clásica) cuando se necesita acercar la cámara al objeto se hace hacia el centro de este, lo que tiende a dejar inalcanzables los

lados del objeto. Para alcanzar los extremos es necesario recurrir a una traslación del centro del objeto, lo que se conoce como navegación *pan*. La navegación esferoidal ahorra al usuario tener que combinar gestos de órbita y de navegación *pan* cuando desea inspeccionar el objeto. Este es el motivo por el que se consideró comparar por separado ambas técnicas para los *targets* situados en el centro y en los laterales del objeto.

En el caso de los *targets* situados en la zona central del objeto, éstos son accesibles por la *trackball* esférica sin necesidad de usar la navegación *pan*. Esta puede ser la razón por la que la ventaja observada de la navegación esferoidal es menor respecto a la esférica. No obstante, sigue existiendo una diferencia significativa. Aparentemente, en la navegación esférica, los participantes emplean los gestos de *pan* en las zonas centrales del objeto, pese a no ser estrictamente necesarios, y lo pagan en rendimiento. Probablemente existen varios motivos que lo justifiquen. Una primera conclusión es que al estar disponible los participantes la usan sin más, sin pensar si es óptimo o no. Sin embargo, no es sólo una cuestión de disponibilidad, la navegación *pan* puede hacer más sencilla la última parte de la tarea, el encaje del *target* dentro de la mirilla. Esto se debe a que la correspondencia entre los gestos del ratón y el movimiento de la cámara es más directa. Por otro lado, pensado en la navegación esferoidal, cuanto más cerca esté la cámara de la superficie del objeto, más se parece la órbita esferoidal a un gesto *pan* (una traslación del centro objeto), lo que hace que el acoplamiento sea también sencillo, sin incurrir en la pérdida de rendimiento que supone cambiar de un gesto a otro.

En los laterales del objeto, la diferencia es mucho mayor. Esto se debe a que cuando se usa la navegación esférica el empleo de navegación *pan* auxiliar es imprescindible para alcanzar estas zonas. En el caso de los *targets* que se encuentran en la zona lateral pero no ocultos, la navegación *pan* sólo es necesaria para el acoplamiento, pero no es imprescindible para localizarlos, ya que un gesto de alejamiento puede ser suficiente para revelar su ubicación. Sin embargo, en el caso de *targets* ocultos por

la geometría de la turbina, concretamente entre los álabes, es más que probable que sea necesario realizar un barrido con la navegación *pan* para poder encontrarlos. Esto explicaría los diferentes resultados en el rendimiento: Una ventaja máxima para la navegación esférica en objetivos ocultos entre los álabes laterales de la turbina; una ventaja ligeramente menor, pero aún grande, para la navegación esférica en objetivos laterales no ocultos; una ventaja menor para objetivos en el centro de la turbina. Aun así, en todas las áreas la ventaja de la navegación esférica es significativa, mostrando una mejora consistente en el rendimiento con respecto al enfoque tradicional basado en la navegación esférica.

Esta ventaja, al estar basada en una reducción en el número de grados de libertad necesarios, también explicaría la mayor usabilidad percibida y la menor carga mental. Estos resultados pueden discutirse en el contexto de la teoría clásica de Bernstein (1967) para el aprendizaje de habilidades motoras. Con objeto de explicar los mecanismos de coordinación motora y su aprendizaje, Bernstein plantea el denominado problema de los grados de libertad. Incluso para las tareas aparentemente más sencillas, como lanzar una pelota, no sólo hay que coordinar un enorme número de grados de libertad del sistema biomecánico humano, sino también, de alguna manera, seleccionarlas, ya que el conjunto de grados de libertad es redundante, es decir, hay múltiples combinaciones que pueden producir el mismo resultado motor. ¿Cómo es posible entonces que las personas logren resolver problemas con tantas variables y consigan mediante entrenamiento destreza en acciones que requieren coordinar tantos grados de libertad? Hay muchas teorías sobre cómo se consigue esto, el propio Bernstein sugiere que, en las primeras fases del aprendizaje, los individuos emplean mecanismos para reducir el número de grados de libertad que entran en juego con el fin de resolver el problema motor. Esta misma hipótesis de “congelar” grados de libertad ha sido extendida por otros en el aprendizaje de habilidades motoras humanas y robóticas (Berthouze & Lungarella, 2004). La navegación

esferoidal constituye una estrategia similar, en la que algunos de los DoF de navegación se “congelan” para simplificar el problema de acceder a la periferia de los objetos que se apartan de la esfericidad.

Pensemos en un ejemplo de navegación clásica que emplea la técnica de la *trackball* virtual esférica para observar un objeto alargado, como el de nuestra evaluación. Supongamos que la cámara está situada en una zona central del objeto, a corta distancia y obviamente apuntando al centro. Supongamos también que ahora se quiere mover la cámara para explorar una zona lateral del mismo. Hay, en principio, dos acciones posibles que moverán la cámara en esa dirección: orbitar hacia ella o hacer un desplazar usando la navegación *pan*. De hecho, estas dos acciones tienen que asignarse a botones diferentes del ratón, o requieren que utilicemos una tecla adicional en el teclado del ordenador. Existen múltiples grados de libertad redundantes para resolver el problema, como en la formulación de Berstein. Sin embargo, si la zona a explorar está lejos en el extremo del objeto, la órbita puede ser en conjunto la elección equivocada, ya que el objetivo no se pondrá nunca al alcance de la cámara virtual. Por el contrario, con nuestro *trackball* esférico es posible limitarse solo a orbitar, ya que la órbita esférica mantendrá la cámara a una distancia cercana y casi constante de la superficie del objeto. Esto resulta en una interacción más eficiente que utiliza un conjunto reducido de grados de libertad.

Es posible también considerar la técnica de navegación propuesta en el marco de la teoría de los esquemas de (Schmidt, 1975). Según esta, cuando los individuos tienen que generar una respuesta motora van a recuperar de su memoria un esquema motor ya desarrollado. Este esquema va a ser alimentado con dos entradas, la situación inicial y la situación final deseada. Con estos datos, el esquema motor se va a adaptar a las condiciones específicas del problema, aunque dichas situaciones no se hayan dado exactamente así en el pasado. Ahora bien, en nuestro ejemplo, cuando un usuario desea moverse hacia un extremo del objeto alargado: en el caso de la navegación esférica, el esquema debe

poner en juego una combinación de gestos de orbita y de desplazamiento *pan*. Mientras, en la navegación esferoidal, el esquema es más simple y solo requiere gestos de orbita. Es lógico pensar que este último, al ser más simple, será un esquema más fácil de adquirir.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se aborda el diseño de dos técnicas de navegación basadas en elipsoides, motivadas por las limitaciones evidenciadas en la navegación esférica clásica, *Virtual Trackball*, al interactuar con objetos que exhiben una baja esfericidad en su forma. Estos objetos desafían la navegación estándar, requiriendo gestos de navegación complejos y poco intuitivos. A pesar de existir estrategias de navegación que se adaptan a la forma de los objetos, buscando mantener una distancia constante entre la superficie del objeto y la cámara en órbita, ninguna de estas estrategias ha sido ampliamente adoptada por la industria de herramientas CAD debido a su complejidad o a problemas inherentes a su aplicación.

Nuestro enfoque se centra en encapsular el objeto dentro de una superficie lisa, un elipsoide virtual, ofreciendo una adaptación que, aunque no es perfecta, asegura la fluidez en los movimientos de la cámara, evitando cualquier posible vibración. Al tratarse de una extensión de las clásicas *Virtual Trackball*, la implementación de esta técnica es muy similar, resultando en un aumento mínimo de complejidad en comparación con las alternativas.

La navegación esferoidal, formulada teóricamente mediante la adaptación de un esferoide al objeto, tiene como objetivo principal proporcionar una interacción más intuitiva y eficiente. Basada en la idea de ajustar el esferoide al eje de rotación intrínseco del objeto, esta técnica ofrece un acceso más natural a las diferentes partes del objeto, evitando la necesidad de gestos de navegación complejos. Su propósito es simplificar la interacción al reducir la complejidad de los grados de libertad y adaptar la superficie del elipsoide a la geometría del objeto, lo

que resulta en una interacción más eficiente especialmente útil en la inspección de áreas laterales.

En contraste, la navegación elipsoidal, concebida como una alternativa, busca solventar las limitaciones inherentes a la navegación esférica. Esta técnica se basa en la representación de un elipsoide cuyos tres ejes principales se ajustan a las dimensiones del objeto, manteniendo la premisa de adaptarse al eje de rotación intrínseco del objeto. A pesar de su mayor complejidad, logra simplificar los gestos de navegación y ajustarse mejor a la forma real de los objetos.

La evaluación de la navegación esférica ha revelado resultados significativos. Se ha observado que esta técnica conlleva tiempos de tarea considerablemente menores en comparación con la navegación esférica al inspeccionar áreas laterales y objetivos ocultos. Además, se ha evidenciado una mejora en la usabilidad percibida y una reducción significativa en la carga de trabajo mental al emplear la navegación esférica en comparación con la elipsoidal. Futuros trabajos abordarán la evaluación de la navegación elipsoidal para analizar si su mayor complejidad se traduce en un aumento de la usabilidad percibida por los usuarios.

Estos descubrimientos apuntan a la navegación elipsoidal como una estrategia más efectiva y favorable en términos de rendimiento y experiencia del usuario al interactuar con objetos virtuales complejos y alargados, como la turbina de gas evaluada en este estudio. Basándose en la reducción de grados de libertad y la simplificación de gestos de navegación, estos resultados convergen con teorías motoras clásicas, como la hipótesis de “congelar” grados de libertad de Bernstein, ofreciendo una perspectiva innovadora en el diseño de interacciones más intuitivas y eficientes en entornos virtuales.

En el marco del proyecto de investigación europeo UiW se desarrolló un prototipo que evaluaba la viabilidad de una navegación cilíndrica adaptada al eje horizontal de una turbina de generación eléctrica. Este

prototipo marcó el punto de partida para la concepción y desarrollo de la navegación basada en esferoides. El desarrollo fue creciendo integrado en la herramienta web desarrollada dentro del proyecto UiW (González-toledo et al., 2015). Finalmente, se dio el paso de crear un visor de modelos de objetos 3D complejos que funcionaba de manera independiente a la herramienta original del proyecto UiW, y que se presentó en el artículo titulado “HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models” (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Garre-Del-Olmo, et al., 2018).

En ese punto, nuestra implementación de la navegación esférica estaba limitada al contexto específico de la turbina del proyecto UiW, lo que requirió una reestructuración integral de sus fundamentos y desarrollo para adaptarla a una amplia gama de objetos y dispositivos de interacción. Este trabajo fue validado durante el desarrollo del proyecto PLUGGY, en el cual se probó con una variedad de objetos y escenarios, posibilitando su aplicación en entornos web, móviles y de escritorio. Los resultados prácticos se presentaron en el congreso EuroVR 2019 (Reyes-Lecuona et al., 2019). Posteriormente, se llevó a cabo la evaluación de la navegación esférica, cuyos hallazgos se publicaron en el estudio “*The Spheroidal Trackball: generalizing the Fixed Trackball for virtual camera navigation*” (Gonzalez-Toledo et al., 2024). En paralelo y desde finales de 2019, se emprendió el desarrollo de la navegación elipsoidal pura, con la intención de evaluar si su mayor complejidad podría abordar de manera efectiva las limitaciones inherentes a la navegación esférica.

Capítulo 4

Gestión de oclusiones

4.1 Introducción

El problema de la oclusión, en el contexto de la visualización tridimensional, se refiere a la situación en la cual un objeto o elemento de interés en un entorno 3D no es visible para un observador debido a la presencia de otros objetos que se interponen entre el punto de vista y él. La oclusión ocurre cuando uno o varios objetos sólidos, que están más cerca del punto de vista del observador, bloquean parcial o completamente la vista de objetos que están detrás de ellos en la escena tridimensional. Esto puede resultar en una pérdida de información visual importante y dificultar la comprensión completa de la escena. Así pues, *la gestión de la oclusión* se refiere a cómo se manejan los objetos que bloquean la visión en entornos 3D para mejorar el acceso visual y la interacción del usuario.

La oclusión es un desafío común en la visualización 3D y se manifiesta en diversas aplicaciones, desde videojuegos y simulaciones virtuales hasta aplicaciones industriales, científicas y médicas. Es necesario que el sistema de visualización o el diseñador de la escena implemente estrategias para abordar este problema. Esto ha llevado al desarrollo de diversas técnicas y enfoques, especialmente en situaciones donde la oclusión puede obstaculizar la comprensión y el análisis de datos.

En un contexto global, la percepción visual es un proceso complejo que implica la interpretación y comprensión de la información visual

que nuestros ojos capturan. Entre las numerosas tareas que realiza la percepción visual, se pueden identificar tres tareas principales: *detección*, *identificación* y *discriminación*. Estas tres tareas de percepción visual son fundamentales para nuestra capacidad de interactuar con el mundo que nos rodea y comprender la información que nos llega a través de la visión. La detección nos permite notar la presencia de estímulos visuales, la identificación nos ayuda a asignar significado a esos estímulos y la discriminación nos permite diferenciar y comprender las características de los objetos y patrones visuales en nuestro entorno. Estas tareas trabajan en conjunto para formar nuestra percepción visual y nuestra comprensión del mundo.

En un contexto de visualización 3D, estas tres tareas de percepción visual se pueden definir de forma más específica. Se habla de la percepción de la estructura espacial, la percepción de las características de los objetos y de la percepción de la relación entre los objetos y su contenido. En su trabajo, Elmqvist & Tsigas (2008) denominan a estas tres tareas como *Target Discovery*, *Target Access* y *Spatial Relation*, y las definen de la siguiente forma:

- Descubrimiento de Objetivos (*Target Discovery*): Esta tarea se centra en la identificación y localización de objetos de interés dentro de una visualización 3D. Los usuarios deben ser capaces de encontrar y reconocer los elementos que desean examinar o manipular dentro de la escena lo más rápido posible. Y deben poder hacerlo incluso cuando estos objetos pueden estar ocultos u obstruidos por otros elementos.
- Acceso a Objetivos (*Target Access*): Una vez identificados los objetos de interés, la tarea de acceso implica la capacidad de interactuar con esos objetos de manera efectiva. Esto implica poder seleccionar, enfocar o realizar acciones específicas con los objetos identificados. El acceso eficiente a los objetivos es

importante para la interacción efectiva con la visualización y la manipulación de datos.

- **Relaciones Espaciales (*Spatial Relation*):** Este punto se refiere a la percepción y comprensión de las relaciones espaciales entre diferentes objetos o elementos en una visualización 3D. Los usuarios necesitan comprender cómo están dispuestos los objetos en el espacio tridimensional, cómo se relacionan entre sí en términos de posición relativa, tamaño, orientación, etc. Esta cuestión es fundamental para lograr entender la estructura y la organización de los datos representados en la visualización.

La gestión adecuada de la oclusión y otras técnicas de visualización juegan un papel crucial en el apoyo a estas tareas al garantizar que los objetos de interés sean visibles y accesibles, y al ayudar a los usuarios a comprender las relaciones espaciales entre los elementos de la visualización.

4.2 Trabajos previos

Abordar la problemática de la gestión de las oclusiones en entornos de visualización conlleva una serie de retos considerables, lo que ha dado lugar a la aparición de una amplia diversidad de técnicas. Estas técnicas, en su conjunto, aplican enfoques y estrategias de diseño variados con el propósito de atender a sus respectivos objetivos. Cada una de ellas se adecúa al procesamiento de distintos tipos de datos, tales como datos gráficos, temporales, de redes, geoespaciales, multivariados; abordan tareas visuales específicas, como la selección, exploración, reconfiguración; y emplean modalidades de interacción diversas, como, por ejemplo, la interacción táctil, interacción mediante teclado y ratón, interacción con dispositivos tangibles y el seguimiento de cabeza o *head-tracking*.

Con el fin de proporcionar una estructura ordenada y sistemática a toda esta variedad de soluciones, Elmqvist & Tsigas (2008) identificaron en su taxonomía cinco patrones de diseño típicos, basados en siete propiedades claves. Estos patrones de diseño ofrecen un marco de referencia valioso para la clasificación y comprensión de estas técnicas. Es común que las técnicas, cada vez más complejas, empleen más de un patrón de diseño para dar solución al problema que se plantean.

El primero de los patrones que describen Elmqvist & Tsigas (2008) se centra en el uso de *Múltiples Ventanas Gráficas*, donde la vista se divide en varias ventanas para mostrar distintas partes de la escena. Esta estrategia es ampliamente utilizada en herramientas de diseño, como pueden ser Blender o Autocad, y resulta efectiva para reducir la oclusión visual, permitiendo una vista detallada de múltiples regiones de interés. Existe una gran variedad de ejemplos en la literatura: En sus respectivos trabajos Bares & Lester (1998) y S. Chen et al. (2022) combinan perspectivas locales y globales para trabajar en entornos virtuales. Mientras que el estudio de Fitzmaurice et al. (2008) emplea esta estrategia en algunas de sus recomendaciones para mejorar la usabilidad en la navegación 3D.

Otro de los patrones importantes son las herramientas de “*Rayos X*” *Virtuales*, que emplean representaciones de objetos transparentes o semitransparentes. Esto posibilita que los usuarios visualicen objetos de interés (*targets*) situados detrás de estructuras opacas que los ocultan (*distractors*). Es posible encontrar el empleo de este tipo de técnicas en contextos muy diversos; por ejemplo, su uso en modelos arquitectónicos, como los trabajos de Bane & Höllerer (2004) y Avery et al. (2009) donde se exploran soluciones de rayos X virtuales para explorar escenas empleando lo que se denomina *Tunnel cut-out*. O el estudio de Bichlmeier et al. (2007), que las emplean para mejorar el diagnóstico médico en una aplicación de realidad aumentada médica.

Muy interesante, para el ámbito de esta tesis, es el trabajo de Elmquist et al. (2007) donde estudian el uso de transparencias dinámicas para la gestión de oclusiones dentro de una aplicación de visualización 3D.

Los *Planificadores de Recorridos* constituyen otra categoría esencial de los patrones, diseñados para facilitar la navegación eficiente en primera persona a través de escenas 3D. Estos planificadores pueden generar automáticamente rutas que minimizan la oclusión y maximizan la visibilidad de los objetos de interés. Algunos ejemplos de este tipo de técnicas las tenemos en el trabajo de Andújar et al. (2004) que las utilizan para generar caminos de exploración en escenas virtuales mediante preprocesado del entorno, o en el de Mühler et al. (2007) que las emplean para seleccionar puntos de visión en combinación con técnicas de rayos X virtuales. Por su parte, el de estudio Neuville et al. (2019) se vale de ellas para proponer un método para calcular automáticamente los mejores puntos de vista en modelos geoespaciales 3D. La solución presentada en el trabajo de McCrae et al. (2009), *Multiscale 3D Navigation*, combina su uso con múltiples ventanas gráficas simultáneas.

Las *Sondas Volumétricas* son otro de estos patrones fundamentales presentados en la taxonomía de Elmquist & Tsigas (2008). Este tipo de técnicas son útiles para explorar volúmenes 3D y revelar información oculta a través de interacciones directas del usuario con la aplicación. Este enfoque es particularmente relevante cuando se requiere examinar estructuras internas de manera precisa y no invasiva. En su artículo, Elmquist & Tudoreanu (2007), muestran el funcionamiento de una sonda esférica llamada *BalloonProbe* que produce una deformación de la escena, en la zona seleccionada, basada en fuerzas de repulsión. Por su parte, los estudios de Zhang et al. (2022) y Maslych et al. (2023) las emplean para implementar sofisticados mecanismos de selección en entornos con oclusiones.

Por último, los *Distorsionadores de Proyección*, también conocidas como técnicas de explosión, son técnicas que alteran la proyección de la escena 3D para mitigar la oclusión. Estos métodos pueden incluir distorsiones específicas que amplían o comprimen áreas particulares de la escena, mejorando significativamente la visibilidad de los objetos. Un ejemplo clásico es el trabajo de Sonnet et al. (2004), que emplea sondas 3D para separar de forma interactiva objetos ocluidos y después volverlos a su posición original. Por su parte, las propuestas de Elmquist & Tsigas (2007) y Ying et al. (2019) emplean cambios de perspectiva y distorsiones, respectivamente, en la visualización 3D para resolver oclusiones en escenas 3D complejas.

Existen otras formas de clasificar los mecanismos y técnicas para la gestión de oclusiones, una manera es hacerlo a partir de su modelo de interacción. Dentro del conjunto de técnicas cuyo modelo de interacción permite las interacciones directas del usuario con los sistemas aparecen el conjunto de técnicas conocidas como *lentes interactivas*. Se trata de una clase importante de métodos de apoyo a la exploración interactiva polivalente. Se inspiran en la metáfora de una lupa, permitiendo mejorar la exploración y comprensión de datos complejos, actuando como herramientas de enfoque y contexto que posibilitan a los usuarios resaltar y ampliar elementos de interés en conjuntos extensos de datos sin perder la vista general.

Como muestran en su estudio Tominski et al. (2017) a lo largo del tiempo se ha realizado extensas investigaciones sobre la utilización y diseño de estas lentes interactivas en el ámbito de la visualización y análisis de datos: desde la representación de redes y gráficos hasta la exploración de series temporales y datos geospaciales. Específicamente, en aquellas situaciones donde la exploración minuciosa de datos resulta fundamental. Un ejemplo ilustrativo es el trabajo de Sadana & Stasko (2014), donde se emplean estas técnicas para la creación de herramientas de selección, ampliación y filtrado

en visualizaciones de diagramas de dispersión 2D, aprovechando la interacción multitáctil. Asimismo, en la investigación de Debiasi et al. (2015), se introduce “3DArcLens”, una técnica interactiva de deformación y filtrado de datos diseñada para la exploración de redes y superficies geográficas. En esta línea en su estudio Rocha et al. (2019) proponen una novedosa técnica de lentes que se focaliza en la visualización multivariante y por capas en superficies arbitrarias.

Existen también múltiples ejemplos en el ámbito específico que se aborda en esta Tesis. Un primer trabajo importante que resaltar es el de Lujin Wang et al. (2005), donde presentan “The Magic Volume Lens”, un marco de lentes volumétricas universal. Se trata de un entorno de *focus+context*³⁰, donde el usuario visualiza el objeto de interés con un alto nivel de detalle y al mismo tiempo consigue una visión general de toda la información que lo rodea. Wang muestra distintos ejemplos de estándares y técnicas avanzadas de renderizado de lentes de aumento volumétricas para la zona de interés, mientras que comprime el volumen restante sin llegar a eliminarlo por completo. Otro ejemplo interesante es el trabajo de Ropinski & Hinrichs (2004), que desarrolla un algoritmo para el renderizado de lentes volumétricas, denominadas *3D Magic Lenses*. Este algoritmo, basado en imagen, utiliza funcionalidades similares a mapeado de sombras para implementar una técnica de rayos X virtuales con distintas formas de lentes. En un estudio más reciente, llevado a cabo por Schwenderling et al. (2023), se emplea este marco universal para

³⁰ En el análisis de Cockburn et al. (2009) se clasifican las interfaces en diversas categorías según su manejo del espacio, tiempo y efecto visual. Definen las interfaces *overview+detail* como aquellas que utilizan una distribución espacial para diferenciar la información contextual de la detallada. Las interfaces de *zoom* se refieren a aquellas que recurren a una separación temporal entre vistas, mientras que las interfaces *focus+context* se caracterizan por eliminar la separación entre vistas, mostrando el enfoque dentro del contexto en una vista continua y unificada.

introducir una técnica que emplea lentes de rayos X virtuales controladas mediante gestos de la mano, para la exploración interactiva de la anatomía humana. En el trabajo de Pindat et al. (2013) se emplean técnicas de lentes en el contexto del diseño industrial asistido por ordenador (CAD). La técnica de visualización que introduce se puede considerar de tipo *overview+detail*, Cockburn et al. (2009), y en ella se combinan múltiples vistas detalladas con técnicas de rayos X virtuales. Esta técnica implementa un mecanismo que perfora las capas externas del modelo hasta llegar a la pieza de interés (*target*).

En el contexto de esta tesis, nuestro trabajo está centrado en dar soluciones para escenarios de visualización exocéntrica de objetos 3D. Específicamente, se busca implementar herramientas que permitan al usuario visualizar, comprender, representar y extraer información de lo que se ha denominado “*productos 3D complejos*”. El adjetivo *complejos* se utiliza en dos sentidos: bien porque están constituidos por múltiples partes, o bien porque tienen geometrías intrincadas con partes de difícil acceso en la inspección. De los múltiples mecanismos disponibles en la literatura se han considerado como los más interesantes los de *cortes (cutaway)*, *rayos X virtuales* y las *vistas explotadas*. Por lo que a continuación se describen con mayor detalle estos mecanismos y su estado del arte.

Técnicas de cortes o cutaways

Esta técnica consiste en recortar el volumen que ocluye a la parte que se desea visualizar, eliminando completamente dicho volumen de la visualización, Figura 81. Tradicionalmente, se ha utilizado en la literatura de ingeniería y en materia didáctica para mostrar la composición interna de diversos mecanismos o productos.

representación de los bordes de corte, ofreciendo varias alternativas de renderizado.

Técnicas de rayos X virtuales

Las técnicas de transparencia, también conocidas como *rayos X virtuales*, comparten una similitud conceptual con las de cortes. La distinción principal radica en que, mientras en las técnicas de cortes el volumen obstructor se elimina por completo de la visualización, en las técnicas de transparencia se preserva su visibilidad, pero se aplica un grado específico de transparencia que permite observar a través de él los objetos previamente ocultos.

Un aporte significativo en este ámbito proviene del trabajo de Burns (2011), que aborda de manera exhaustiva todos los aspectos relacionados con la transparencia, desde el modelo conceptual hasta las técnicas de renderizado a un nivel más detallado. Destaca la introducción del concepto de *importancia continua*, mediante el cual se aplica diferentes niveles de transparencia a distintas partes en función de su relevancia en el contexto. Además, introduce la noción de *realces de bordes*, que permite ajustar la transparencia en relación con la posición relativa entre la cámara y el objeto de interés. Estos conceptos han servido de base para el desarrollo de la técnica de transparencia adaptativa descrita en la sección 4.6 de este trabajo.

Aunque las técnicas de transparencia tienen limitaciones para comprender la estructura o composición de productos altamente complejos, se utilizan de manera extensa como complemento de otras técnicas más potentes. Un ejemplo de ello se observa en la combinación de cortes con transparencia (Burns & Finkelstein, 2008) o en la conjunción de diagramas de explosión con transparencia (Ritter et al., 2000).

Técnicas de vistas explotadas

Las vistas explotadas, también conocidas como diagramas de explosión, representan una técnica ampliamente empleada en la gestión de oclusiones. Esta técnica aborda las oclusiones mediante la reubicación de las partes que obstruyen, revelando así las secciones ocultas. Los diagramas de explosión han sido otra de las herramientas tradicionalmente utilizada en la literatura técnica y en ingeniería. En este caso para ilustrar la composición de un mecanismo, tal y como se muestra en la Figura 82. No obstante, la funcionalidad de los diagramas de explosión se amplía significativamente cuando se implementan como animaciones interactivas, en las que se permite al usuario controlar varios aspectos, como la cantidad de explosión, las partes de interés y el punto de vista.

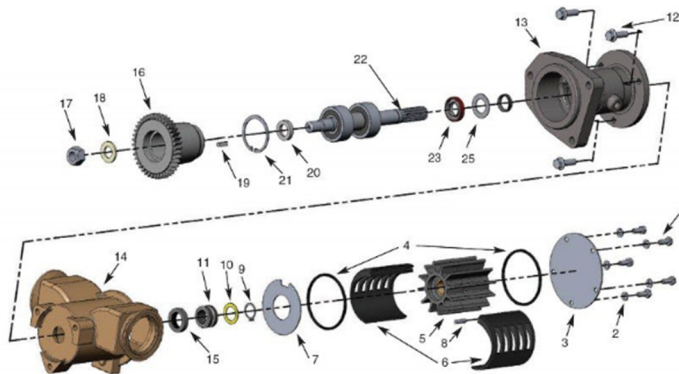


Figura 82. Ejemplo clásico de diagrama de explosión de un mecanismo. Fuente [Wikimedia Commons](#). Esta imagen tiene licencia [Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional](#).

En el artículo de Kalkofen et al. (2009), se plantea una discusión en torno al uso de diagramas de explosión como una alternativa a las técnicas de transparencia o cortes en visualización tridimensional. La premisa central es que los diagramas de explosión permiten maximizar

la cantidad de información visual relevante al mismo tiempo que conservan las relaciones espaciales entre los componentes del objeto. En contraste, las técnicas de transparencia o cortes a menudo implican un compromiso entre revelar partes ocultas y mantener la referencia visual de las partes que están ocultando.

Según introduce Kalkofen, para implementar un diagrama de explosión efectivo es necesario definir una jerarquía de producto, una secuencia de explosión que tenga en cuenta los posibles bloqueos entre las partes, así como direcciones y distancias de explosión para cada parte. Estos conceptos son parcialmente heredados de Agrawala et al. (2003), aunque, en su caso, aplicado al diseño de instrucciones de ensamblaje. En este trabajo, partimos de esas ideas tratando de extenderlas, como se detalla en la sección 4.7.

En el trabajo de Kalkofen se distinguen dos tipos de diagramas de explosión: el *symmetric layout*, que se asemeja a una ilustración tradicional y muestra la composición completa del producto en un solo diagrama de explosión, y el *focused layout*, que se centra en una pieza seleccionada por el usuario y hace que las partes que la ocultan se desplacen para revelarla. En nuestra contribución, implementamos estos dos tipos de diagrama, extendiendo el concepto de *focused layout* no a una única pieza, sino a una selección de cualquier número de piezas que pueden estar separadas espacialmente.

Un aspecto relevante en la generación de diagramas de explosión interactivos proviene del trabajo de Li et al. (2008), que se enfoca en la mejora de los diagramas de explosión tradicionales mediante la incorporación de interacción. Li propone varias formas de interactuar con un diagrama de explosión, como la expansión y contracción animada, la manipulación directa, la exposición automática de las partes objetivo y la técnica denominada *riffling*. Además de la interacción, el trabajo de Li se centra en la generación automática de

los parámetros necesarios para crear un diagrama de explosión a partir de la geometría tridimensional del producto. La implementación de estos u otros métodos de parametrización automática está fuera del alcance del presente trabajo. Este proyecto opta por un enfoque de parametrización manual.

4.3 Propuesta

Como se ha evidenciado, existe una gran variedad de trabajos previos encaminados a afrontar los desafíos asociados a la gestión de oclusiones en entornos de visualización 3D. Estos trabajos emplean multitud de estrategias con el fin de adaptarse a diferentes contextos, dependiendo de la naturaleza de los datos y las tareas a abordar. Aunque todos comparten como objetivo central la gestión de las oclusiones visuales, cada enfoque presenta sus propias ventajas y desventajas, ya que priorizan o sacrifican diversos aspectos en un necesario equilibrio. Por ejemplo, las técnicas de corte maximizan la visibilidad al eliminar por completo los volúmenes que causan oclusiones, aunque a expensas de perder la referencia a algunas partes del objeto. En contraste, las técnicas de transparencia mantienen todas las referencias visibles, pero reducen la visibilidad al representar objetos a través de otras piezas semitransparentes y no permiten el acceso. En ambos casos, comprender las relaciones espaciales entre las partes que causan oclusiones y las ocluidas puede resultar difícil. Por otro lado, las técnicas de explosión resultan más adecuadas para maximizar la comprensión de las relaciones espaciales y conservar todas las referencias, aunque pueden no garantizar la visibilidad desde todos los puntos de vista.

La tendencia pasa por el uso de técnicas mixtas, de forma que se puedan obtener el mayor número de ventajas posibles, evitando los inconvenientes. Esta ha sido la vía seguida en este trabajo, optándose por el desarrollo de diferentes técnicas de forma que el usuario puede

escoger qué técnicas utilizar y cómo combinarlas en base a las condiciones de visualización a las que se enfrente en cada momento.

Por otro lado, el contexto de esta tesis se mueve en un ámbito específico: abordar el desafío de la visualización y gestión de datos en entornos de *productos 3D complejos*. Estos productos se caracterizan por ser representaciones tridimensionales de objetos que constan de una gran cantidad de componentes relacionados jerárquicamente. Ocurre que, cuando se trabaja con este tipo de objetos, es habitual que se disponga de un *modelo de producto* que acompaña a la geometría y especifica el sistema, habitualmente empleando lenguajes específicos, como SysML. Por otro lado, el modelo mental que los usuarios tienen sobre este tipo de productos se revela aquí de gran relevancia. Este modelo mental va a priorizar las partes del producto y su jerarquía en lugar de centrarse únicamente en la ubicación espacial.

Las técnicas desarrolladas en esta tesis van pues a considerar que las partes que causan oclusiones y las que se ven ocluidas son aquellas definidas en la jerarquía del producto, y no se van a limitar a considerar solo volúmenes o áreas espaciales. Esta perspectiva nos condujo a descartar la adopción de técnicas como las denominadas *3D Magic Lens*, que se basan principalmente en ubicaciones espaciales y en la identificación de áreas o volúmenes de oclusión. Por otra parte, como se ha visto en los capítulos anteriores, el modelo mental del usuario tiende a conceder prioridad a ejes específicos que resultan relevantes para el producto. Estos ejes primordiales también se han tenido en cuenta al parametrizar las técnicas desarrolladas.

En resumen, la propuesta de esta tesis se centra en el desarrollo de un conjunto de técnicas de gestión de oclusiones basadas en el modelo del producto. La utilización conjunta de estas técnicas permitirá a los usuarios resolver las diferentes situaciones de oclusión

que se le presenten durante la visualización, permitiéndole interactuar según su modelo mental del producto.

La idea de usar modelos de productos en visores 3D no es nueva. A menudo el software CAD para ingeniería incluye potentes visores 3D para modelos de productos de ingeniería (SolidWorks (Systèmes, 2013)). Sin embargo, el foco se pone en la creación y edición de productos o en tareas como la simulación o la generación de *layouts* de ingeniería, más que en la visualización para acceder a la información del modelo de producto y la interfaz con aplicaciones externas.

Por otro lado, la mayoría de los algoritmos presentes en la literatura implican una gran complejidad. Puede que esto sea la causa por la que la industria tiene dificultad a la hora de adoptarlos. Sin embargo, el hecho que las técnicas desarrolladas en esta tesis se apoyen en el modelo del producto y no solo en cuestiones geométricas va a permitir, en cierta forma, reducir la complejidad de los algoritmos empleados. Este aspecto es otro de los objetivos clave de esta tesis: que las técnicas desarrolladas puedan ser usadas con dispositivos de interacción convencionales, como son el teclado y el ratón o las pantallas táctiles. Y que, además, sean lo suficientemente livianas para poder ser integradas en cualquier tipo de dispositivo, ya sea este un dispositivo móvil o en un navegador web.

Para lograr el objetivo descrito, en el ámbito de esta tesis se proponen cinco técnicas distintas, que, empleadas de forma conjunta, van a buscar dar respuesta a las tres tareas de percepción visual básicas: Descubrimiento de Objetivos, Acceso a Objetivos y Relaciones Espaciales. Estas cinco técnicas van a permitir la selección, eliminación y/o aislamiento de partes del objeto 3D, la transparencia adaptativa y las vistas explotadas.

Por otro lado, la implementación de estas técnicas de oclusión seguirá el principio de transición gradual para proporcionar una retroalimentación suave al usuario de sus acciones y, por tanto, hacerle consciente de lo que está ocurriendo en cada momento, evitando transiciones bruscas, que pueden provocar que el usuario se sienta perdido. De esta manera, la explosión se llevará a cabo con movimientos suaves de los modelos 3D, y la eliminación y la transparencia de las partes se realizan con una disminución gradual.

En la próxima la sección 4.4 presentaremos la selección jerárquica que es una herramienta clave para el resto técnicas. En la sección 4.5 presentaremos las técnicas de Eliminación y Aislamiento. En la sección 4.6 la transparencia adaptativa y finalmente las vistas explotadas en la sección 4.7. El modelo del producto sobre el que basan todas estas técnicas será presentado ya el siguiente capítulo.

4.4 Selección jerárquica

La selección es el primer paso para la mayoría de las tareas de manipulación, como enfocarse en una parte específica, visualizar una parte seleccionada sin que existan oclusiones o extraer cierta información sobre la parte elegida. Para poder realizar la selección de una parte de un objeto 3D es necesario tener acceso a esa parte. Esto es posible de forma sencilla si esa parte es visible, pero puede resultar imposible si se encuentra totalmente ocluida. Por tanto, antes de poder seleccionar es necesario garantizar que es posible localizar todas las partes incluso cuando se encuentra ocultas.

Existen múltiples formas de abordar la tarea de la selección, como puede verse en el estudio de Argelaguet & Andujar (2013). En su trabajo LaViola et al. (2017) las clasifica mediante su descomposición en subtareas, mientras que en su clasificación Poupyrev & Ichikawa (1999) las descomponen según la metáfora de interacción empleada.

En todo caso, una primera aproximación para abordar este problema es emplear la técnica del puntero virtual mediante *ray-casting*. Esto permite apuntar a las distintas partes del objeto (indicación), haciendo uno del dispositivo, para finalmente elegir (confirmación) la parte que se desea seleccionar. El problema de esta técnica radica en que no es posible realizar la subtarea de indicación cuando el objeto, o la parte de este, que se desea seleccionar esta parcial o totalmente ocluida.

Una rápida revisión de la bibliografía nos lleva a distintos trabajos que intenta resolver este problema: en su trabajo Argelaguet & Andujary (2009) presentan una técnica que aplana localmente los objetos potenciales en torno a la dirección apuntada, proyectándolos en una ventana auxiliar. Por su parte, en su propuesta Vanacken et al. (2007) presentan dos técnicas; una basada en una lente de semi transparencia (*3D bubble cursor*) y la otra con un control doble de orientación y profundidad (*the depth ray*). En trabajos más recientes, tanto Zhang et al. (2022) como Maslych et al. (2023) proponen el uso de técnicas bimanuales. Los primeros basada en la intersección de un rayo con un plano, apoyada en el uso de transparencias, y los segundos apoyados el uso de mini mapas.

Ninguna de estas soluciones parece fácilmente adaptable al escenario al que se pretende dar solución en esta tesis; una visualización exocéntrica y que pretende ser usada en dispositivos de interacción de bajo coste, teclado y ratón o táctiles. Además de su aparente complejidad, en algunos casos, tanto de uso como de implementación.

Todo esto nos hizo decantarnos por una técnica de selección dual basada en la clásica técnica del puntero virtual mediante *ray-casting* pero que se asienta sobre un modelo de producto conocido. Esto permite que el usuario puede completar la tarea de selección a través

de dos vías: gráficamente mediante *ray-casting* en el objeto 3D o a través del modelo, una representación textual del mismo. No obstante, es en ambos casos el modelo del producto el que determina que partes son seleccionables y como. Este mecanismo permite, además, poder realizar una selección jerárquica.

Una selección jerárquica es posible cuando las distintas partes están estructuradas según una jerarquía, de tal forma que unas partes están formadas por otras. Por ejemplo, el sistema de suspensión un vehículo estará formado por los subsistemas de suspensión delanteros y traseros, por el subsistema de la dirección, el de las ruedas y el de los frenos. A su vez el subsistema de las ruedas estará formado por llantas, neumáticos, rodamientos, ejes, bujes y tornillos entre otros. En este contexto una selección jerárquica va a permitir, con un solo gesto, seleccionar o solo una llanta o todas las partes de las ruedas o todo el subsistema de suspensión al completo, según el deseo del usuario.

La selección basada en el *ray-casting* del dispositivo de interacción ofrece la posibilidad de señalar y seleccionar distintas secciones de un objeto 3D con facilidad a través de gestos sencillos. El modelo es el encargado de determinar qué secciones pueden ser objeto de selección y si esta acción puede realizarse de forma individual o agrupada, lo que habilita una selección jerárquica. En este proceso, se brinda al usuario la capacidad de elegir el nivel jerárquico al que se dirige la selección. Esta configuración dictamina qué partes son destacadas como resultado del gesto de selección, ya sea una sección específica, un conjunto de partes o la totalidad del modelo. Como ejemplo, en la Figura 83, a la izquierda, se muestra cómo mediante un único gesto del dispositivo es posible seleccionar todo un conjunto de partes, los motores en su totalidad, mientras que, a la derecha, se permite la selección individual de partes más específicas, abarcando diferentes componentes de los motores. Este método de selección presenta una

limitación evidente, ya que no es capaz de resolver el acceso a las partes ocluidas, solo es capaz de acceder a las partes del objeto 3D que se encuentran visibles. La segunda estrategia de selección hace posible eludir este problema.

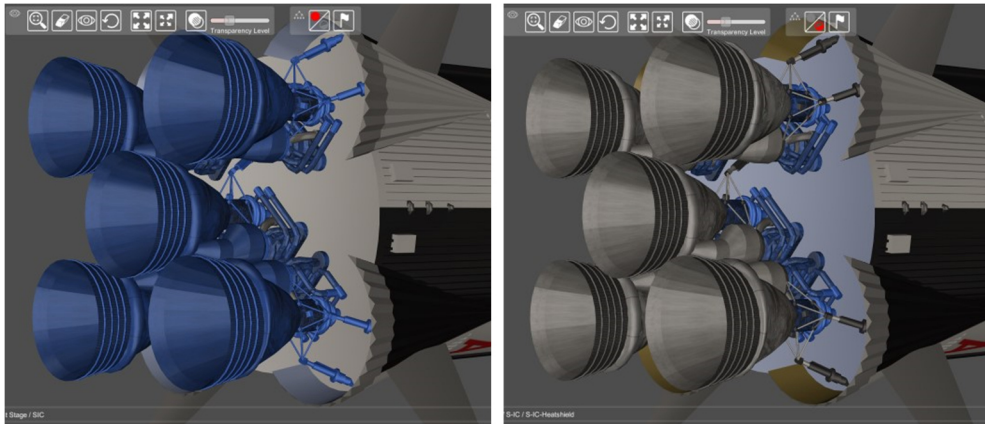


Figura 83. Ilustración de la selección jerárquica. Izquierda: selección a nivel de un nodo de producto (motores para cohetes). Derecha: selección a nivel de área (tuberías de combustibles).

La segunda estrategia de selección propuesta en esta tesis se basa en la interacción a través del modelo del producto. Se plantea la representación del modelo del producto a través de un árbol jerárquico, que permita al usuario seleccionar cualquier componente del producto en cualquier nivel de jerarquía. Esto da como resultado la selección automática de todos los nodos hijos relacionados. Este árbol jerárquico puede formar parte de las opciones de visualización del visualizador 3D, por ejemplo, como en el trabajo de Li et al. (2007), o puede formar parte de la aplicación que integra el visualizador 3D, como se muestra en la Figura 84.

Adicionalmente, esta estrategia de selección abre la puerta a que la propia aplicación realice la acción de selección de forma autónoma, en lugar de depender únicamente de la interacción directa del usuario.

Esto podría desencadenarse en respuesta a consultas a una base de datos o en reacción a eventos del sistema, como alertas de temperatura, por ejemplo. El método de selección sugerido ofrece, además, la opción de emplear códigos de colores para destacar las partes o zonas seleccionadas. Esta funcionalidad posibilita que las aplicaciones configuren códigos de colores con el propósito de comunicar información de manera efectiva al usuario.

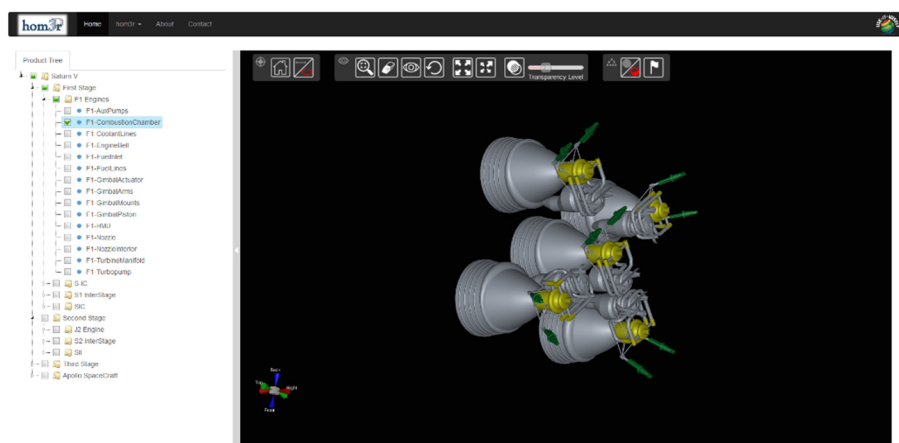


Figura 84. Selección de partes de un objeto 3D a través del árbol jerárquico del modelo de producto.

Desafortunadamente esta estrategia de selección, a través del modelo, resuelve solo parcialmente el desafío de la oclusión, ya que permite la selección de partes que podrían estar ocluidas, pero no garantiza que sean visibles después de la selección si están completamente ocluidas. No obstante, al lograr la selección de la parte previamente ocluida, se abre la posibilidad de aplicar otras técnicas para abordar la oclusión. En este contexto, esta Tesis propone las técnicas de aislamiento, transparencia adaptativa y vistas explotadas, que se describen a continuación.

4.5 Eliminación y Aislamiento

Se presentan aquí dos técnicas de gestión de oclusiones que se caracterizan por su simplicidad. El primero de estos mecanismos, la “*eliminación de partes*”, permite a los usuarios seleccionar componentes específicos de un objeto 3D para su exclusión de la visualización, como se ilustra en la Figura 85. Esta herramienta se inspira en las técnicas de cortes o *cutaways* que recortan el volumen que ocluye a la parte que se desea visualizar, eliminándola de la vista, como puede verse en los trabajos de Li et al. (2007) y Sigg et al. (2012). En este caso, en lugar de llevar a cabo cortes volumétricos tridimensionales, se procede a la eliminación completa de partes del modelo en la visualización. La elección de estas partes se efectúa en concordancia con la selección del usuario y la estructura del producto, con el propósito de mantener la coherencia en la representación del objeto 3D y, por ende, la relación espacial entre sus componentes.

En consecuencia, este mecanismo posibilita la visualización y el acceso a componentes que pueden resultar de interés para el usuario y que estaban previamente ocultos por las partes eliminadas. Esta función permite, por tanto, una gestión manual de las oclusiones. En consecuencia, requiere que el usuario posea un conocimiento previo sobre la ubicación de las partes de interés, ya que debe ir eliminando aquellas que están generando la oclusión.

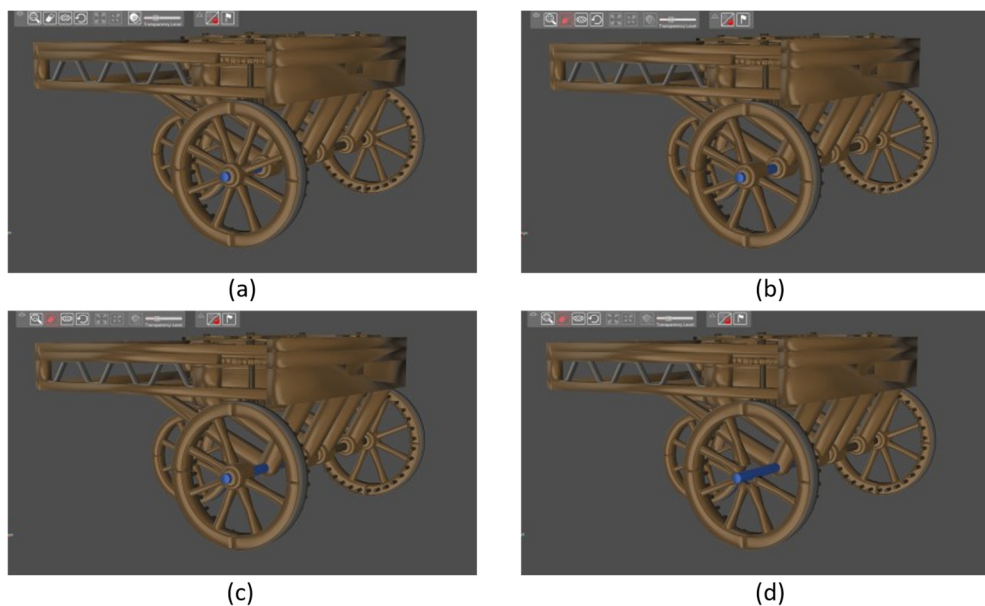


Figura 85. Ilustración de la eliminación progresiva de partes, para acceder al área de interés, mostrada en azul.

La técnica de *aislamiento* consiste en mostrar de forma aislada solo la parte o partes del producto que son de interés. De tal forma que: se deben seleccionar las distintas partes del producto que son de interés y todas las demás partes del modelo del producto se eliminarán de forma automática. Además, el punto de vista se ajustará de manera automática para enfocarse en la parte seleccionada. Todos estos cambios, borrado de partes y enfoque, se van a producir de forma gradual, buscando minimizar la pérdida de relación espacial entre las distintas partes del objeto, como puede verse en la Figura 86.

No obstante, esta técnica no resuelve la cuestión de cómo seleccionar las partes que inicialmente no son accesibles debido a la oclusión. Para abordar este problema, se requiere recurrir a la selección a través del modelo del producto, como se detalló en la sección anterior.

Aunque la técnica de aislamiento resulta útil para dirigir la atención del usuario hacia una parte específica en el contexto de una tarea determinada, lo consigue a expensas de la pérdida temporal de todas las relaciones espaciales entre la parte aislada y el resto del modelo del producto. Para ayudar a superar las limitaciones inherentes a la eliminación de partes y el aislamiento, se han implementado los mecanismos de transparencia adaptativa y vistas explotadas que se explican a continuación.

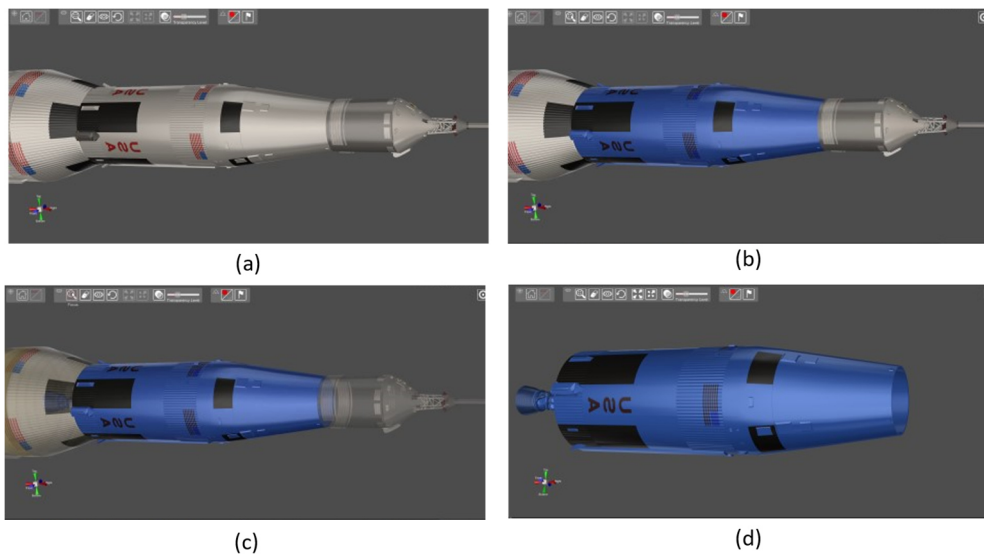


Figura 86. Ejemplo del funcionamiento de la técnica de aislamiento. En (a) se puede ver el objeto 3D al completo, mientras que en (b) el usuario ha seleccionado la parte de interés. En (c) se muestra un fotograma del periodo de transición gradual, en la que las partes que van a ser eliminadas se desvanecen poco a poco para proporcionar un *feedback* adecuado del proceso de transición hasta el resultado final, mostrado en (d).

4.6 Transparencia adaptativa

La técnica de *transparencia adaptativa* es un mecanismo más complejo que los anteriores. Ofrece la posibilidad de visualizar una

parte oculta sin perder la relación espacial entre las distintas partes del producto. Se englobaría en la categoría de técnicas llamadas de *virtual X-ray*. La solución propuesta se asemeja al trabajo de Ropinski & Hinrichs (2004), pero en lugar de renderizar volúmenes transparentes fijos, el sistema elige las áreas del modelo producto que se harán transparentes en función del punto de vista, ver Figura 87. De esta forma, empleado junto a la selección mediante el modelo del producto, ayuda en la tarea de descubrir las partes del producto manteniendo las relaciones espaciales entre las partes, facilitando pues comprender la estructura global del producto.

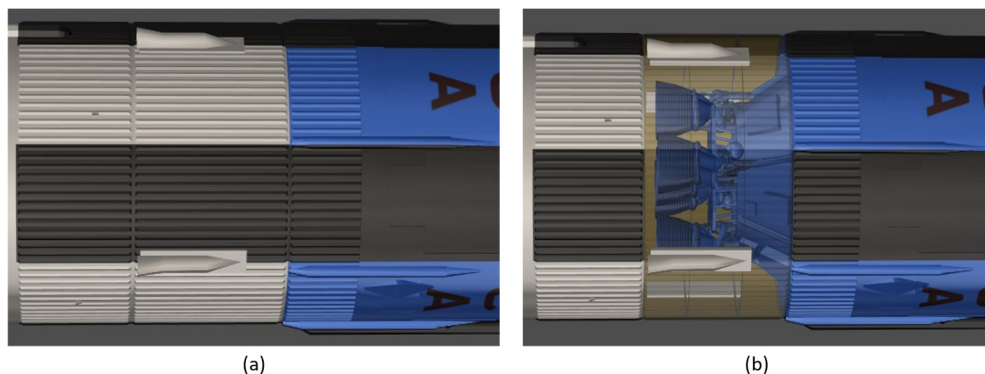


Figura 87. Ejemplo de la función de transparencia adaptativa. La imagen de la izquierda muestra el producto sin efectos de transparencia. La imagen de la derecha muestra la función de transparencia adaptable, en la que las partes seleccionadas se marcan en azul y todas las zonas que ocluyen la selección se representan con transparencia parcial.

El funcionamiento parte de una selección de piezas de interés para el usuario. En función del punto de vista el sistema calculará que partes del modelo del producto están ocluyendo a esta selección y, de forma automática, las hará transparentes o semitransparentes. Si, en este punto, se produce un cambio del punto de vista se calcula que piezas de las que se habían hecho transparentes se deben volver visibles y que nuevas piezas deben hacerse transparentes, ver Figura

88. Además, la técnica va a permitir elegir el grado de transparencia a aplicar.

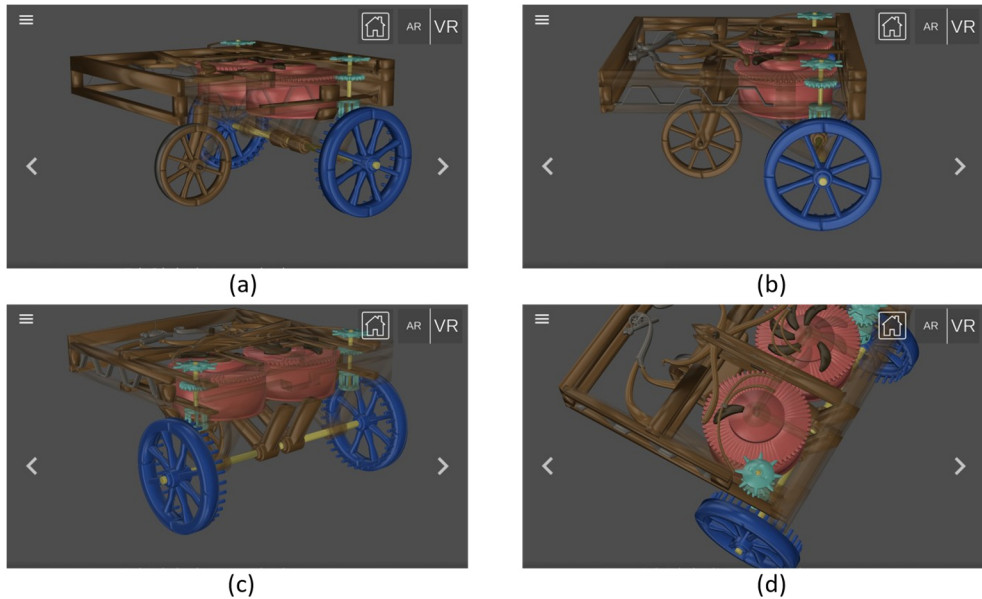


Figura 88. Ejemplo que muestra la función de transparencia adaptativa mientras se cambia el punto de vista.

En la Figura 89 se muestra un diagrama del funcionamiento completo del algoritmo, el cual basa su funcionamiento en la técnica de *ray tracing*. Dada una selección de partes del objeto se calculan los puntos destino de estos rayos. Para cada objeto seleccionado estos puntos serán: el centro de *bounding box* y N puntos equiespaciados a lo largo de cada uno de sus semiejes (X , Y , Z) de la misma. Esto hace un total de $6N+1$ puntos por objeto. Además, se va a fijar un límite de máximo total de M puntos.

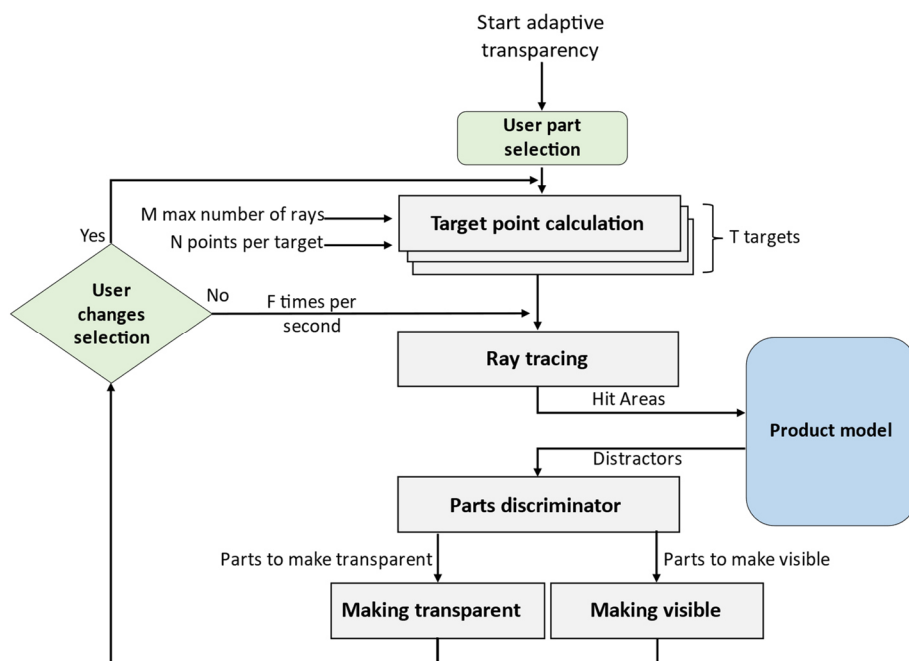


Figura 89. Diagrama de funcionamiento del algoritmo de transparencia adaptativa.

Una vez se tienen los puntos destino, desde la posición de la cámara se lanza una serie de rayos en dirección a cada uno de ellos. El patrón de rayos que se obtiene es el que se puede observar en la Figura 90. Este patrón de rayos es muy sencillo y podría ser fácilmente mejorado. Sin embargo, gracias a esta sencillez demostró un buen funcionamiento en todas las pruebas realizadas en distintas plataformas (web, móvil, y aplicaciones *standalone*) y con distintos tipos de objetos.

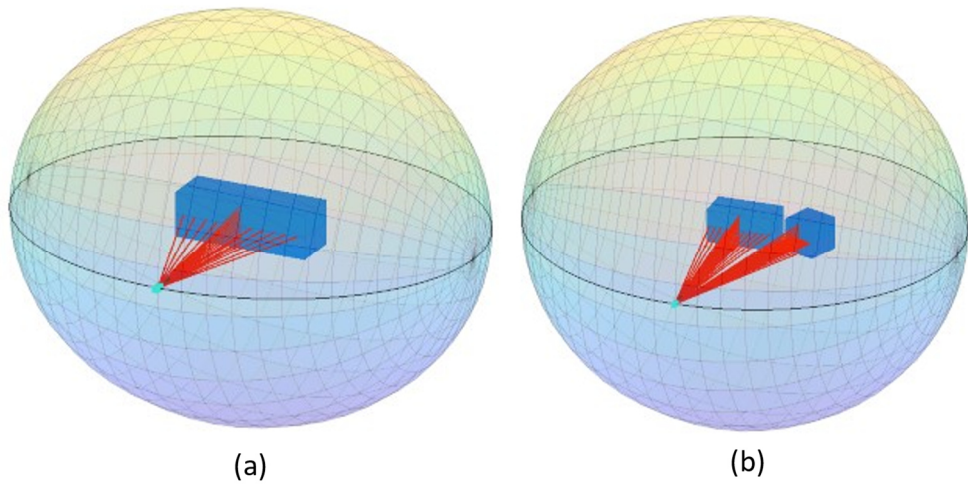


Figura 90. Ejemplo del patrón de *raycasting* empleado para la detección de distractores sobre un objeto (a) y sobre dos (b).

Estos rayos van a colisionar con distintas áreas del modelo 3D. Con la información recogida se consulta el modelo de datos del producto y se decide que partes³¹ del objeto 3D son las que están ocluyendo la visión (*distractors*). Con esta lista de *distractors* se decide que partes del objeto 3D se deben hacer transparentes y cuales opacas, en función del estado previo. Tras esto se dispara un proceso, independiente para cada una de las partes, de cambio gradual de su estado de transparencia.

Se establece ahora un bucle con el bloque de lanzamientos de rayos, con objeto de adaptarse a los cambios en el punto de vista, es decir los movimientos de la cámara. Este bucle se ejecutará un número de veces por segundo configurable mediante el parámetro F. Por otro lado, los puntos destino de los rayos solo se recalcularán en el caso de

³¹ Como se verá en el capítulo 5 el modelo del producto propuesto va a permitir distinguir entre las partes que forman un objeto y las áreas de cada una de esas partes.

que el usuario cambia la selección. De tal forma que se consigue mantener actualizado qué objetos están ocluyendo la vista en todo momento.

Como se ha visto a lo largo de la explicación previa, el algoritmo permite su ajuste mediante tres parámetros. El primero de ellos es el parámetro F , que permite ajustar la frecuencia a la que se realiza el bucle búsqueda de distractores. Cuando mayor sea su valor mayor será la carga de proceso y menor será la latencia entre los movimientos de la cámara y la actualización de la escena. Por otro lado, tampoco se precisa de un valor muy elevado para lograr una usabilidad adecuada. Tras diversas pruebas con sujetos, la implementación realizada en esta Tesis se ajustó para realizar la búsqueda de distractores cada 300 ms ($F = 3.33\text{Hz}$).

El cálculo del número de rayos por cada objeto se decide mediante el parámetro N y el número máximo total de rayos por el valor M . Si se sobrepasa el número máximo de rayos, porque se han seleccionado gran cantidad de objetos, se reducirá el número de rayos que se lanzan por cada objeto proporcionalmente. De tal forma que en este caso se emplearía un N nominal de:

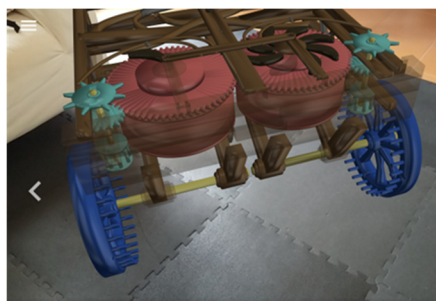
$$N_{nominal} = \frac{1}{6} \left(\frac{M}{\text{number of selected areas}} - 1 \right) \quad (98)$$

La elección de estos dos valores (N y M) permite que se pueda ajustar la resolución del algoritmo y la carga computacional máxima. Cuanto mayores sean estos valores, más difícil será que se escapen objetos *distractores* del cálculo, pero obviamente se requerirá más potencia del proceso. Otra opción podría ser poner un N elevado pero un M más restrictivo. De esta forma cuando se selecciona un solo objeto, o solo unos pocos, se tendría una máxima precisión mientras que esta descendería en una selección más amplia. Esta configuración puede tener sentido si se argumenta que son casos de uso distinto:

una selección pequeña puede ser un escenario en que se busca un trabajo más en detalle y por tanto se necesita más precisión. Mientras que en una selección de múltiples partes el usuario busca una vista más general.

La flexibilidad en la configuración de estos parámetros abre la posibilidad de adaptarse al dispositivo en que está funcionando. De modo que, en dispositivos con menos capacidad de procesado se pueden usar unos parámetros más restrictivos. A lo largo del desarrollo de esta Tesis se realizaron pruebas en distintos dispositivos, ordenadores de sobremesa, portátiles, teléfonos móviles, tabletas y navegadores³². Finalmente se decidieron usar los siguientes valores para los parámetros como una solución de consenso: $N=5$, $M=100$ rayos y, el ya mencionado de, $F = 3.33\text{Hz}$. Estos valores funcionaron razonablemente bien en todas las plataformas en situaciones variadas, como se puede ver en la Figura 91.

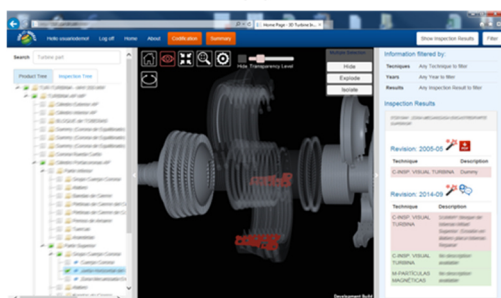
³² Los navegadores pueden considerarse plataformas independientes puesto que suelen tener una gran limitación de acceso a los recursos hardware de la máquina. Por ejemplo, al uso de las tarjetas gráficas.



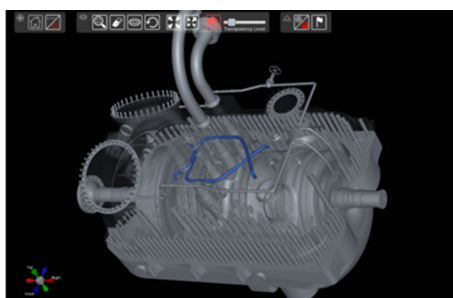
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 91. Ejemplo de funcionamiento de la técnica de transparencia adaptativa en diferentes entornos. (a) Realidad aumentada en una aplicación móvil, (b) y (c) entorno web y (d) aplicación de escritorio.

4.7 Vistas explotadas

La técnica de la transparencia adaptativa permite ver aquellos objetos que se encuentran ocluidos, pero sigue sin resolver el problema del acceso a estos objetos. Así pues, aún no se ha resuelto como seleccionar, mediante la interacción con la geometría 3D, una parte que este ocluida por completo. Sí que es posible, como vimos, seleccionar partes totalmente ocluidas a través del modelo del producto.

Para dar respuesta a estas situaciones se ha desarrollado el mecanismo de las *vistas explotadas*. Este mecanismo va a realizar un desensamble o despiece inteligente e interactivo de determinadas

partes del producto, como respuesta a peticiones del usuario a través de la interfaz gráfica. Esto le va a permitir acceder a las partes internas del producto manteniendo las relaciones espaciales entre ellas, véase la Figura 92.



Figura 92. Modelo 3D del cohete Saturno V al que se le ha aplicado una vista explotada de tipo simétrica. El sistema separa las partes manteniendo las relaciones espaciales, de tal forma que se pueden advertir las distintas etapas del cohete.

Se han implementado dos tipos de vistas explotadas, la general o simétrica (*symmetric layout*) y la enfocada (*focused layout*). La simétrica procede a desensamblar todas las partes del producto susceptible de ello, y además lo hace en la misma proporción. Por su parte, la vista explotada enfocada se aplica solo a la parte del producto indicada por el usuario, véase Figura 93. De tal forma que, el sistema realizará el desensamble sólo de la parte indicada por el usuario. Es además acumulativa, de tal forma que es posible ir explotando distintas partes hasta localizar la parte de interés. Por otro lado, si la parte indicada se encuentra bloqueada, el sistema desensamblará una a una todas las partes del producto necesarias hasta conseguir desensamblar la parte requerida.

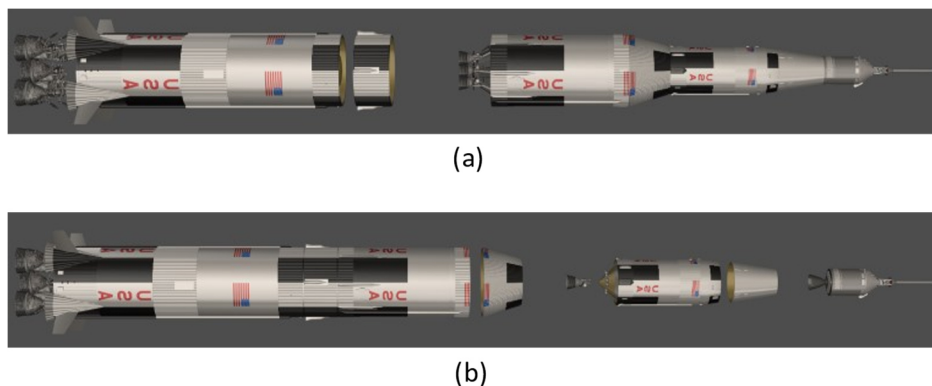


Figura 93. Modelo 3D del cohete Saturno V al que se le ha aplicado vistas explotadas de tipo enfocado. En (a) se muestran desensamblados las distintas partes que forman la primera etapa (parte izquierda), mientras que en (b) se muestran las de la última etapa.

Generar una vista explotada consiste en la traslación de cada pieza del producto desde su posición original a una posición destino. Como se puede aventurar este problema no es sencillo de resolver en general. Esto es debido a múltiples factores, como pueden ser los bloqueos entre las partes, que producen choques entre las piezas al desplazarlas, los distintos ejes de desplazamiento posibles o a la necesidad de mantener las relaciones espaciales entre las partes. Para resolver este problema es necesario considerar diferentes elementos claves, a saber: la jerarquía del producto, la secuencia de explosión, las direcciones de movimientos de las piezas, los bloqueos entre ellas y las distancias que deben moverse.

El primero de los elementos clave para definir el problema es el de la *jerarquía del producto*. Pero como ya se ha resaltado, la aproximación empleada en esta Tesis a la gestión de oclusiones se basa en disponer de un modelo del producto, el cual contiene toda la *jerarquía* de las distintas partes que forman el sistema. Esto será tratado en profundidad en el próximo capítulo, titulado Propuesta de Modelo. En consecuencia, para ser capaces de generar diagramas de

explosión lo que se hará es añadir toda la información necesaria a este modelo del producto, mediante atributos asociados a cada uno de los nodos. A continuación, se va a detallar cuál es la información que se debe añadir al modelo.

Un segundo elemento clave es la *dirección de la explosión*. Las diferentes partes del objeto 3D se moverán siguiendo una dirección desde su posición original hasta una posición final. Para lograr la mayor versatilidad posible esta dirección debería poder ser distinta para cada pieza. Por tanto, cada nodo del modelo va a tener asociada una dirección de traslación. La definición de esta dirección puede basarse en diferentes criterios: las direcciones de ensamblaje, las relaciones espaciales que se desean conservar con otros nodos, la prevención de oclusiones visuales entre nodos y consideraciones del modelo mental del producto (un eje preferido, por ejemplo).

Otro elemento relevante en la resolución del problema es la *secuencia de bloqueos*. Para representar la transición gradual de un estado colapsado a un estado explotado, es necesario establecer una secuencia u orden en el que los nodos deben moverse. Esto depende de los bloqueos entre los nodos del producto, ya que un nodo no puede comenzar a explotar si está bloqueado por otros en su dirección de explosión, ver Figura 94. Si lo que se desea es una explosión que siga una secuencia ordenada y lineal, lo habitual en software de ingeniería como *SolidWorks* o *Pro/Engineer*, la secuencia se puede expresar como un número que indica el orden de cada nodo dentro de la secuencia. Sin embargo, si lo que se espera es una animación más fluida, en la que varios nodos puedan moverse de forma simultánea, esto no es suficiente. En este caso, es necesario que cada nodo mantenga una lista de otros nodos que, de no estar ya explotados, bloquearán su camino, para determinar si es posible o no comenzar su movimiento.

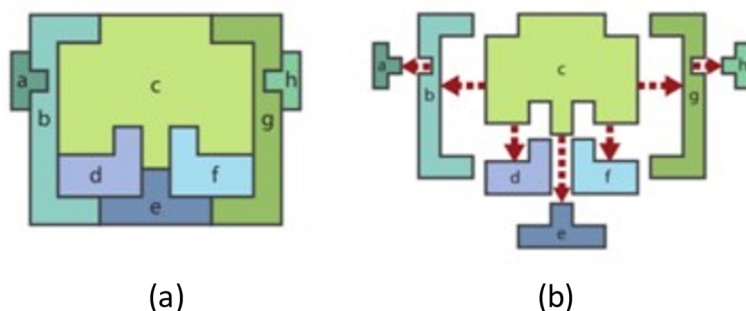


Figura 94. Ejemplo de secuencia de explosión (Li et al., 2008)(Li et al., 2008). En la figura de la izquierda se puede observar que D no puede empezar a moverse si antes no se ha movido A, B y E.

Otros dos puntos clave son los *desplazamientos máximo y mínimo*. El desplazamiento máximo indica la cantidad de traslación a aplicar a un nodo para que alcance su configuración final de máxima explosión. Para definir este valor es necesario realizar un análisis en el que se equilibren distintos factores: El punto de vista, no es deseable que las piezas se salgan de la vista de la cámara; la oclusión visual, es necesario separar suficiente las piezas para lograr el objetivo de resolver las oclusiones y las relaciones entre piezas que se desea destacar, por ejemplos separando menos las partes que tienen más relación.

El *desplazamiento mínimo*, por otro lado, tiene unos condicionantes totalmente distintos. Su función esta encuentra relacionada con la secuencia de bloqueos, se trata de la cantidad de desplazamiento mínima que se debe aplicar a un nodo para eliminar el bloqueo que está ejerciendo sobre otros. Su valor se podría calcular de forma automática ya que depende únicamente de cuestiones geométricas. En la Figura 94, por ejemplo, para que la pieza D pueda desplazarse hacia abajo es necesario que la pieza B se haya desplazado una cantidad suficiente. Por tanto, la cantidad de desplazamiento mínimo de B depende el bloqueo que ejerce sobre D.

La *secuencia de la explosión*, o la secuencia de la animación que lleva de una vista colapsada a una vista explotada, será calculada por el sistema en función de: el tipo de explosión seleccionado, la pieza indicada por el usuario y la información de ensamblado almacenada en los nodos de la jerarquía del producto. Si se analiza el caso de la vista explotada enfocada. El usuario indicará una pieza del modelo que desea que se desensamble, supongamos que indica la pieza D en la Figura 94, el sistema va a recorrer toda la secuencia de bloqueos desde D hasta encontrar que pieza o piezas pueden empezar a mover, no están bloqueadas. En este caso serían las partes E y A, que empezarían a mover al unísono. Cuando la pieza A se desplace lo suficiente empezará la traslación de la pieza B, sin tener que esperar a que A se detenga. Finalmente, cuando tanto B como E se hayan movido lo suficiente para desbloquear su recorrido, D empezará su desplazamiento. El caso del diagrama de explosión simétrico es solo una generalización, se empezará recorriendo el árbol de bloqueos de forma recursiva desde el nodo raíz, empezando el movimiento de todas las partes que no están bloqueadas, para ir desplazando poco a poco todas aquellas que se vayan liberando. Un ejemplo puede verse en Figura 94b.

Como se ha podido observar la información de desensamblado necesaria para poder generar las vistas explotadas debe estar distribuida por todos los nodos de la jerarquía del producto, no sólo para los nodos finales, de esta forma se pueden obtener distintos tipos de diseños de explosión, donde por ejemplo el nivel de explosión de cada nodo permita mostrar la naturaleza jerárquica del producto. La generación de vistas explotadas más sofisticadas precisara de la definición de parámetros más específicos de los definidos aquí. En el caso de esta tesis esta información de ensamblado se ha introducido manualmente, pero existen mecanismos para generarla de forma automática, como por ejemplo el método sugerido en el trabajo de Li

et al. (2008), pero se ha considerado este tipo de automatismo fuera del alcance de esta Tesis.

4.8 Conclusiones

La gestión de oclusiones se centra en abordar el desafío de poder identificar, localizar, visualizar y seleccionar partes de objetos 3D que se encuentran total o parcialmente ocultas. Nuestra propuesta aborda este desafío en el escenario de los productos 3D complejos. En este tipo de objeto, son relevantes tanto la jerarquía entre las distintas partes que forman el producto, como el modelo mental que el usuario tiene del mismo. Se han explorado diversas técnicas para resolver este problema, adaptándolas a un contexto de visualización exocéntrica y dispositivos de interacción de bajo costo, como teclados, ratones o pantallas táctiles.

Se han desarrollado dos métodos de selección jerárquica, los cuales permiten a los usuarios seleccionar partes del modelo 3D en diferentes niveles de la jerarquía. Esto les permite enfocarse en las secciones específicas de objetos 3D que deseen, según la tarea que tratan de resolver. El primero de los métodos diseñados se basa en selección gráfica usando *ray-casting* sobre el modelo 3D, mientras que el segundo permite la selección a través de un árbol jerárquico de selección. Ambos métodos presentan ventajas e inconvenientes; si bien el primero de ellos es rápido e intuitivo no permite la selección de partes totalmente ocultas; en cambio la selección a través del árbol requiere reconocer en el modelo de producto la parte que se desea seleccionar y no garantiza su visualización posterior.

Las técnicas de eliminación y aislamiento se presentan como soluciones simples para gestionar oclusiones. La eliminación permite a los usuarios seleccionar partes específicas para su exclusión de la visualización, mientras que el aislamiento muestra sólo las partes de

interés y ajusta el punto de vista automáticamente. Estas técnicas son útiles para facilitar el acceso a partes ocultas y mantener la atención del usuario en áreas específicas. Presentan sin embargo claras limitaciones, la principal es que entorpecen la comprensión de las relaciones espaciales entre las partes del objeto. Además, la eliminación requiere un conocimiento previo de la ubicación de la parte de interés, a fin de ir borrando las partes que la ocluyen; el aislamiento, por su parte, necesita de la selección a través del modelo del producto, si lo que se desea es aislar partes que se encuentran ocluidas.

La técnica de transparencia adaptativa resuelve el problema de la oclusión al permitir la visualización de partes ocultas sin perder las relaciones espaciales entre las partes del objeto 3D. Esta técnica selecciona automáticamente qué áreas del modelo deben volverse transparentes según el punto de vista del usuario, lo que facilita la comprensión de la estructura global del producto. La selección de partes que se encuentren totalmente ocultas requiere aun de la selección a través del modelo del producto.

Las vistas explotadas o diagramas de explosión son un mecanismo interactivo que desmonta partes del producto de manera inteligente, manteniendo las relaciones espaciales. Se han implementado dos tipos de vistas explotadas: simétricas y enfocadas. La vista explotada simétrica desmonta todas las partes del producto en la misma proporción, mientras que la vista explotada enfocada se aplica solo a partes específicas indicadas por el usuario. Estas vistas explotadas permiten acceder a partes internas y resolver el problema de la selección de partes completamente ocultas.

La resolución de situaciones de oclusión en entornos tridimensionales es un desafío que no puede subestimarse, ya que existen múltiples escenarios en los que partes de objetos 3D pueden

quedar fuera del campo de visión. Pretender, en general, resolver una situación empleando exclusivamente una única técnica de gestión de oclusiones puede dar lugar a resultados insatisfactorios para el usuario, ya que cada enfoque tiene sus propias fortalezas y limitaciones. En consecuencia, la estrategia óptima que proponemos y que ha guiado nuestro desarrollo es la combinación de las diferentes técnicas implementadas de forma interactiva, adaptándonos a cada situación particular. Un ejemplo de una combinación que maximiza el compromiso entre los diferentes factores comentados sería la suma de transparencia adaptativa y explosión. Esta técnica combinada cuenta con los beneficios comentados de la explosión, conservar relaciones espaciales y referencias, pero minimiza sus desventajas, al permitir visualizar las partes de interés desde cualquier punto de vista. Lo que esta técnica combinada no resuelve por completo es la máxima visibilidad al haber cierto grado de opacidad en las partes que ocluyen, pero si el usuario deseara maximizar este factor, bastaría con que utilizase las funcionalidades de eliminación y aislamiento, combinadas o no con las otras técnicas.

En el próximo capítulo, 5. Propuesta de Modelo, se va a presentar la implementación de un *modelo jerárquico de componentes* como eje central del modelado de los sistemas complejos. El objetivo de este modelo será proporcionar una descripción integral del sistema que facilite la organización coherente de toda la información del sistema, incluida la información que va a permitir la implementación de las técnicas que se han descrito en este capítulo.

Las diversas estrategias de gestión de oclusiones expuestas en este capítulo, junto con la estrategia general que las engloba, basada en la combinación de técnicas y el uso fundamental del modelo jerárquico del producto, se han concebido y sometido a evaluación en el contexto de dos proyectos de investigación europeos: UiW y PLUGGY. Estos proyectos han desempeñado un papel crucial al orientar de manera

iterativa nuestro proceso de desarrollo y brindarnos la oportunidad de poner a prueba nuestras ideas y soluciones en entornos reales. Concretamente, en el marco del proyecto UiW, creamos un prototipo de herramienta colaborativa destinada a la industria de plantas de energía, tanto fósiles como nucleares, mientras que el proyecto PLUGGY se centró en el desarrollo de aplicaciones para la preservación del patrimonio cultural.

A medida que se desarrollaban, los diversos avances se dieron a conocer en distintas etapas a través de artículos y presentaciones en congresos especializados. En la conferencia EuroVR 2015, se presentó la primera versión de estas herramientas de gestión de oclusiones integradas en el marco de la herramienta desarrollada en el proyecto UiW (González-toledo et al., 2015). En 2017, en el capítulo titulado “Collaborative Management of Inspection Results in Power Plant Turbines” (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, et al., 2017), incluido en el libro "Dynamics of Long-Life Assets," se detalló cómo nuestras técnicas de gestión de oclusiones se integraron en un entorno industrial, brindando una solución práctica y beneficiosa para las empresas. El funcionamiento técnico de esta herramienta se presentó en el artículo de la revista “HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models” (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Garre-Del-Olmo, et al., 2018). En esta etapa, nuestras técnicas de gestión de oclusiones demostraron su versatilidad al funcionar eficazmente en objetos industriales y en contextos web y autónomos. Finalmente, en el congreso EuroVR 2019, en la presentación de Reyes-Lecuona et al. (2019) se destacó la adaptación de estas herramientas a entornos móviles y a objetos de uso más generalizado.

Capítulo 5

Propuesta de Modelo

5.1 Introducción

La industria manufacturera está experimentando cambios significativos, impulsados por varios factores simultáneos: el progreso económico y político, los avances tecnológicos y la interconexión social. Las empresas se enfrentan al desafío de adaptarse a esta transformación, colaborando con diversos actores en sus redes de valor. Por otro lado, el diseño de sistemas productos y servicios complejos requiere la colaboración de extensos equipos de ingeniería y expertos de diferentes dominios. Cuando además estos sistemas se someten a actualizaciones recurrentes durante su vida útil, se requiere un proceso de ingeniería bien gestionado. En el caso de productos y servicios industriales de larga duración, la búsqueda de soluciones económicamente viables y ambientalmente sostenibles se vuelve imperativa, respaldada por nuevos modelos de negocio basados en la creación de valor colaborativo.

Estos sistemas complejos se componen de numerosas piezas interconectadas. Cada función se ejecuta gracias a la colaboración entre múltiples subsistemas organizados jerárquicamente, desde niveles generales hasta elementos físicos específicos. Por ejemplo, el sistema de aterrizaje de una aeronave incluye subsistemas como el tren de aterrizaje y el mecanismo de extensión/retracción, compuestos por ruedas, frenos, motores hidráulicos, entre otros elementos.

El modelado de sistemas, en conjunto con las herramientas colaborativas en línea, se han erigido como elementos fundamentales

para abordar estos desafíos inherentes a la complejidad actual. La evolución tecnológica ha propiciado además que la representación tridimensional (3D) de las diversas partes que componen estos sistemas complejos pueda ser considerada otro factor clave en la solución de dichos retos. Esta perspectiva busca que las herramientas colaborativas integren la representación en 3D como un elemento central en su funcionalidad, permitiendo así una mayor eficiencia en la comprensión, interacción y colaboración en entornos multidisciplinares y distribuidos.

En este contexto, ¿por qué no emplear toda la información que se conoce de un sistema para mejorar la usabilidad de las técnicas de interacción 3D?

En la actualidad, las estrategias de interacción presentes en el software comercial suelen estar ancladas en metodologías clásicas de uso generalizado en la comunidad. Sin embargo, estas estrategias no se adaptan a los modelos tridimensionales y, en su mayoría, se sustentan exclusivamente en criterios geométricos globales. A lo largo de esta tesis, hemos postulado la idea central de que las estrategias de interacción tridimensional deberían adaptarse a características intrínsecas a los modelos 3D con los cuales se interactúa, tales como los ejes de rotación vistos en el capítulo 2 o las relaciones de aspecto estudiadas en el capítulo 3. Este planteamiento permitiría aprovechar toda la información contenida en la representación de sistemas para lograr sistemas de interacción que se ajusten dinámicamente a la geometría de los objetos. Asimismo, se abriría la posibilidad de implementar técnicas de gestión de oclusiones, como las propuestas en el capítulo 4, más precisas y eficaces en comparación con los enfoques tradicionales, mejorando así la interacción y la eficiencia en entornos de visualización y manipulación tridimensional.

5.2 Trabajos previos

El modelado de sistemas se ha convertido en un pilar fundamental de la ingeniería y la gestión de sistemas complejos. El enfoque de esta metodología consiste en la representación abstracta de sistemas físicos, biológicos o conceptuales, con el propósito de comprender, analizar, diseñar y comunicar aspectos clave de su funcionamiento. En el contexto contemporáneo, el modelado de sistemas se ha convertido en un componente esencial en diversas disciplinas, desde la ingeniería de software hasta la ingeniería de sistemas, la biología o la gestión empresarial.

La complejidad actual de los sistemas plantea desafíos notables en su comprensión y desarrollo. La falta de herramientas adecuadas para representar y comprender la interacción entre sus componentes, así como la gestión de su escalabilidad y heterogeneidad, son problemas principales a los que se enfrenta el modelado de sistemas. Además, la necesidad de una comunicación clara y precisa sobre los requisitos, diseño y comportamiento del sistema con múltiples partes interesadas ha impulsado la evolución constante de esta disciplina.

El objetivo principal del modelado de sistemas es proporcionar un marco estructurado para capturar, analizar y comunicar información relevante sobre sistemas complejos. Esto incluye la identificación y documentación de requisitos, la visualización de la arquitectura, la simulación del comportamiento esperado y la verificación de la consistencia entre los distintos componentes de un sistema. Nuestra propuesta es que el perfeccionamiento de las técnicas de interacción también forme parte de estos objetivos.

La evolución del modelado de sistemas ha sido un proceso dinámico que ha experimentado cambios significativos con el tiempo. Desde los enfoques iniciales hasta las herramientas contemporáneas

como UML y SysML, se ha visto una progresión en la representación de sistemas complejos. En las décadas de 1960 y 1970, se utilizaban principalmente modelos matemáticos y diagramas de flujo. Con la llegada de la informática en los años 80, surgieron los primeros lenguajes de modelado estructurado, enfocados en representar datos y procesos. En los años 90, surgió un hito con la llegada del Lenguaje Unificado de Modelado (UML). La fusión de las metodologías de Booch, Jacobson y Rumbaugh (Booch et al., 2015) dio origen a este estándar para el modelado orientado a objetos. UML permitió la representación visual de la arquitectura, estructura y comportamiento de sistemas software, brindando un marco común para la comunicación entre equipos de desarrollo.

A medida que la ingeniería de sistemas abarcaba una gama más amplia de sistemas complejos, surgió la necesidad de un lenguaje que fuera capaz de modelar sistemas físicos y sistemas de ingeniería más allá del software. Así nació el Lenguaje de Modelado de Sistemas (SysML) en la década de 2000, como una extensión de UML adaptada para la ingeniería de sistemas (Friedenthal et al., 2014). SysML proporciona diagramas y elementos adicionales para representar aspectos físicos, comportamiento dinámico, requisitos, análisis y otras características de sistemas de ingeniería más amplios.

En la actualidad a esta disciplina se la conoce como ingeniería de sistemas basada en modelos (Nataliya Shevchenko, 2020) (MBSE, por sus siglas en inglés) y sigue evolucionando gracias a una amplia gama de investigaciones científicas y su adopción en diversos ámbitos como un medio para gestionar la complejidad de los sistemas. Actualmente, se utiliza en finanzas para simular y predecir el comportamiento de los mercados financieros, en empresas para representar procesos de negocio y flujos de trabajo, en biología para modelar interacciones moleculares o sistemas ecológicos con el fin de comprender mejor el funcionamiento de los sistemas biológicos. Asimismo, se están

implementando activamente en agencias espaciales, como se destaca en los esfuerzos de la ESA y la NASA (Daniel Hoffpauir, 2019; ESA, 2023).

Otro campo que ha adoptado este enfoque, destacando su importancia, es el AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción). Aquí ha surgido la metodología conocida como Building Information Modeling (BIM). Los modelos BIM (Ivson et al., 2020) buscan una aproximación integral para la planificación, diseño, construcción y gestión de proyectos de infraestructura y construcción. Estos se basan en la creación y utilización de modelos digitales inteligentes y colaborativos que albergan información detallada sobre todos los aspectos de un proyecto, incluyendo datos geométricos tridimensionales clave. Además de la representación visual en 3D, contienen datos sobre las propiedades físicas y funcionales de los elementos constructivos, así como información relevante para su gestión y mantenimiento a largo plazo. En este contexto, la información, sobre los objetos 3D, esencial para mejorar las técnicas de interacción podría también formar parte del modelo de datos.

En la industria, se han utilizado diversas metodologías y modelos para diseñar y desarrollar sistemas complejos. Entre ellos, se destacan el *modelado de sistemas físicos*, que emplea modelado físico-matemático para describir el comportamiento dinámico, y el *modelado de componentes*, que se enfoca en representar elementos individuales y su integración en sistemas más grandes. También se encuentran el *modelado de fiabilidad y mantenimiento* para predecir vida útil y estrategias de mantenimiento, la *simulación dinámica* para entender comportamientos dinámicos, y el *modelado de sistemas híbridos*, que combina enfoques físicos y lógicos. Además, en la industria aeronáutica se emplean enfoques específicos para la aerodinámica, modelos matemáticos y simulaciones para comprender el

comportamiento aerodinámico de las aeronaves y el análisis de fatiga y resistencia estructural.

Actualmente no existe un equivalente de la metodología BIM para el ámbito industrial, pero han surgido iniciativas que buscan integrar datos de diseño y operativos, abarcando fases como fabricación, logística y puesta en marcha. Estas propuestas aspiran a utilizar los datos, modelos 3D e información de procesos a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación o producto (Santiago Martínez de la Casa, 2023).

Podemos destacar el trabajo realizado en el proyecto de investigación *Use-it-Wisely* (European Commission, 2016), financiado por la UE, en el que el autor participó. En este proyecto se propuso un modelo de datos llamado APS (*the extended Actor-Product-Service model*) (Pasquinelli et al., 2017), cuyo objetivo era capturar todos los datos del ciclo de vida del sistema y permitir una ingeniería colaborativa eficiente basada en los principios de MBSE. En este proyecto el autor de esta tesis participo en un caso industrial específico, (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, et al., 2017), en el que se empleó el modelo APS para definir la turbina de una planta de energía y las inspecciones técnicas. Este modelo interrelacionó la geometría tridimensional de la turbina con la información de mantenimiento e inspección.

5.3 Propuesta

Todo lo expuesto junto con nuestra experiencia en el proyecto de investigación *Use-It-Wisely*, nos llevan a considerar que la tendencia de la industria apunta hacia la adopción gradual de enfoques integrales basados en metodologías MBSE. El sector de la construcción es un buen ejemplo de ello gracias a la adopción de la metodología BIM.

Estos enfoques integrales buscarán una estructura de modelado que consiga integrar la mayor cantidad de información posible sobre un sistema, que sean colaborativos y que estén interconectados, de tal forma que se promueva una mejor comprensión y gestión integral del sistema. En un escenario ideal, un modelo fusionaría los datos geométricos tridimensionales con los datos físicos, lógicos y de componentes del sistema, junto con el resto de información relativa a la fiabilidad, el mantenimiento y las simulaciones funcionales.

La propuesta de esta tesis en este ámbito se estructura alrededor de dos hitos. En primer lugar, se postula la implementación de un *modelo jerárquico de componentes* como eje central de estos *metamodelos* integrativos. Este modelo persigue proporcionar una descripción integral del sistema, facilitando la organización coherente de toda la información derivada de los diversos modelados del sistema.

Por otro lado, se propone que las técnicas de interacción y visualización 3D en sistemas complejos *empleen la información contenida en estos modelos unificados con el propósito de optimizar la interacción*. Este enfoque busca superar la dependencia exclusiva de criterios geométricos en las técnicas de interacción, adaptándose mejor a las particularidades de cada sistema. El objetivo es ajustar los sistemas de interacción a los modelos cognitivos de los usuarios, quienes, al fin y al cabo, son los que desempeñan un papel clave en la construcción y mantenimiento del modelo del sistema a lo largo de su ciclo de vida.

En el modelado industrial se hace uso de herramientas software de diseño asistido por ordenador (CAD) como AutoCAD, SolidWorks o CATIA para modelar y simular componentes específicos de objetos industriales en un entorno virtual antes de su fabricación o implementación. Estas herramientas emplean ya algún tipo de grafo o modelo de producto para organizar los distintos componentes

tridimensionales. Así pues, nuestra propuesta implicaría conectar esos modelos con un modelo centralizado del sistema y que las técnicas de interacción se adaptasen a los modelos 3D gracias a toda la información disponible.

En los capítulos anteriores se han abordado técnicas de navegación y gestión de oclusiones, las cuales se valen de la información de los modelos para adaptarse a la geometría y mejorar la usabilidad. En el resto de este capítulo se discutirá cómo incorporar esta información a los modelos de sistemas, para ello se introducirá el concepto de modelo jerárquico de componentes como el pivote central del modelado.

5.4 Modelo jerárquico de componentes

Dada la complejidad inherente de los sistemas complejos, los cuales constan de una multitud de componentes interrelacionados, resulta lógico que la información relacionada con estos sistemas se organice de manera estructurada, a menudo siguiendo una disposición jerárquica. No obstante, frente a esta misma complejidad, sería ingenuo suponer que una única estructura lógica de información podría abordar todos los desafíos de modelado requeridos por la industria. Por el contrario, dependiendo de la tarea específica de modelado a resolver, se necesitará manejar tipos de información concretos y organizarlos de manera específica. Esto conlleva a la existencia de múltiples posibilidades para implementar modelos de datos en sistemas complejos.

Un caso específico en el que el autor participó es el de una turbina de generación eléctrica. En este sistema, se implementa un doble modelo de datos: uno asociado al ensamblado y desensamblado, y otro vinculado a las inspecciones. La complejidad surge debido a la distinción que se hace entre las partes individuales en los diferentes modelos. Por ejemplo, un elemento clave son las coronas, conformadas

cada una de ellas por álabes, compuestos cada uno por una raíz y un perfil. No obstante, desde la perspectiva de las inspecciones, los perfiles de todos los álabes en una corona se consideran como una unidad, mientras que las raíces se tratan como otra entidad independiente. Esto se debe a que se someten a inspecciones en momentos y con técnicas diferentes, lo que implica una gestión particular de la información.

Podemos, sin embargo, observar que los diferentes tipos de modelado empleados en el ámbito industrial comparten la característica de proporcionar información específica relacionada a diversas partes físicas del sistema. Ya sea a través del modelado de sistemas físicos, simulación dinámica, fiabilidad y mantenimiento, o sistemas híbridos, todos estos enfoques persiguen obtener datos que se relacionan con componentes o áreas específicas dentro del sistema.

Estos motivos nos llevan a considerar que disponer de un modelo de componentes del sistema que adopte una estructura jerárquica con forma de árbol es un paso esencial para lograr el propósito de centralizar la información proveniente de diferentes modelados. El propósito de este modelo es condensar toda la estructura física/lógica del sistema. Para ello debe recoger todos los subsistemas o partes que lo forman y toda la información relativa a las relaciones jerárquicas entre ellas.

Este modelo de producto, que se muestra en la Figura 95 utilizando UML, está basado en trabajo de Rey (2013) y consiste en una estructura de árbol donde cada nodo del árbol representa distintas partes de un sistema. Esta estructura del árbol está representada por el bucle en los grupos de nodos de producto. Los nodos de producto representan subsistemas o componentes de un subsistema, mientras que los nodos área representan partes dentro del componente de un sistema. Este enfoque se justifica debido a que, aparte de la estructura

jerárquica de las piezas, en ciertos contextos las partes que conforman el sistema no son lo suficientemente pequeñas para funcionar como hojas en el árbol. Para ilustrar este punto, consideremos el sistema de tracción de un automóvil, compuesto por elementos como neumáticos, llantas y rodamientos. Cuando nos referimos a inspección o mantenimiento, es posible que deseemos hacer mención de una zona específica de una pieza, como una parte del neumático (o la raíz de los alabes en el caso de una turbina).

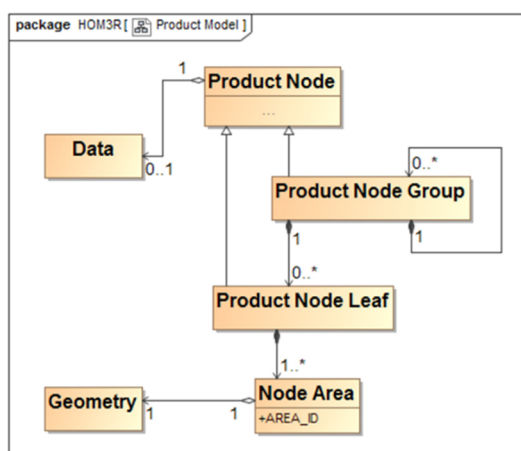


Figura 95. Diagrama de clases simplificado del modelo de jerárquico de componentes.

En el modelo propuesto hay dos tipos de nodos de productos: aquellos que pueden tener otros nodos hijos (grupos de nodos de producto) y aquellos en la punta de las ramas del árbol, que no tienen hijos (hojas de nodos de producto). Dado un sistema complejo a modelar (por ejemplo, un vehículo) los nodos de producto representan los distintos subsistemas que le dan forma (por ejemplo, el subsistema de propulsión, eléctrico, de suspensión, etc.). Los nodos hojas representan los distintos componentes físicos que dan forma a cada subsistema, por ejemplo, del subsistema de las ruedas dependerían los nodos hojas: llantas, neumáticos, rodamientos, ejes, bujes y tornillos

entre otros. De esta forma, los nodos hojas representan a las partes físicas más pequeñas del sistema. Por esta razón, son los elementos más pequeños de la estructura que tiene sentido visualizar gráficamente de forma aislada.

Cada nodo del árbol va a contener datos asociados. Estos permiten incorporar toda la información relevante para el modelo, ya sean de tipo físico, lógico, de simulaciones o de ensamblaje. Sobre estos nodos del árbol se asociarán también la información necesaria para la interacción 3D.

De los nodos hojas cuelgan las áreas, que representan distintas partes que forman un componente físico. De esta forma un componente puede estar formado por una única área o bien puede estar formado por distintas áreas. Esta solución aporta, como se ha resaltado, una flexibilidad extra al modelo, de tal forma que el diseñador va a poder diferenciar las distintas áreas relevantes dentro de cada componente, sí es que así lo desea. Además, ofrece la posibilidad de interconexión entre modelos, como se expondrá a continuación.

La información geométrica está específicamente asociada a las áreas, lo que implica que un componente físico puede estar compuesto por varias mallas 3D. Esta estructura permite contar con datos de transformación 3D para cada área, posibilitando la reutilización de los mismos archivos de malla 3D para las geometrías que se repiten dentro del producto, como alabes o tornillos. Por otro lado, esta organización jerárquica en nodos y áreas ofrece una ventaja adicional. A pesar de que las geometrías puedan ser compartidas, los datos asociados son independientes. Por ejemplo, en el caso de un automóvil, si se detecta un desgaste significativo en las ruedas delanteras, aunque la geometría de las ruedas sea compartida, el nodo correspondiente a las ruedas delanteras puede tener anotaciones diferentes al nodo de

las traseras. Asimismo, en otros escenarios hipotéticos, un árbol de mantenimiento diferente al de ensamblado o reciclaje podrían tener datos completamente distintos, todos vinculados a la misma geometría.

5.4.1 Relación entre modelos

Durante las distintas fases de la vida de un sistema complejo deben ser resueltos multitud de problemas de modelado, desde los modelados iniciales de diseño hasta los de fiabilidad y mantenimiento. La función del modelo jerárquico de componentes es la de describir la estructura lógica del dispositivo y de todos sus componentes, por lo que su estructura podría no ser la más adecuada para dar respuesta a problemas de modelado que requieran otros enfoques. La solución pasa por la existencia de distintas estructuras de datos, adaptadas a cada una de ellas a la problemática que se deben resolver.

No obstante, una característica común de estos modelados es que siempre refieren sus análisis, resultados o datos a componentes físicos del sistema, o a partes de estos componentes. Por ejemplo, un modelado dinámico del sistema estimará las temperaturas de funcionamiento de distintitos componentes, mientras que uno de fiabilidad y mantenimiento indicará cuando deben ser evaluados o reemplazados esos mismos componentes. En el modelo jerárquico de componentes, que se ha presentado, recoge esta idea con la inclusión de los nodos áreas, que representan distintas zonas dentro de los componentes físicos. Su introducción de pretenden convertirlos en punto de unión entre distintas estructuras de datos, permitiendo interrelacionarlas y por tanto avanzar hacia un metamodelo integrador.

Un ejemplo de esta interrelación entre modelos se llevó a cabo durante el proyecto *Use-It-Wisely*, en el que se estudió la integración

de un modelado de producto³³ junto con uno de inspecciones y mantenimiento con el objeto de desarrollar una herramienta web de trabajo colaborativo (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, et al., 2017).

El modelo de inspecciones de mantenimiento estaba formado por el árbol de inspecciones y resultados. Mientras que el árbol del pretendía mostrar la estructura jerárquica de componentes del sistema, el árbol de inspecciones expresaba la forma en que se realizan las inspecciones de este. Al igual que la estructura del producto es estable, la estructura del modelo de inspección también lo es a lo largo todo el ciclo de vida del sistema.

Los nodos de este árbol de inspección, ver Figura 96b, no representan las partes físicas del producto, sino partes o capas de la inspección. Siendo los nodos hoja las áreas de inspección, es decir, los puntos que se van a inspeccionar. Estas áreas de inspección representan las secciones del sistema que se inspeccionan al mismo tiempo independientemente de que formen parte del mismo componente físico. Este se debe a que, en este contexto, es importante mantener juntas la inspección de piezas que están físicamente próximas o que tienen las mismas condiciones de funcionamiento/ambientales. De este modo, el modelo de inspección va a representar la estructura y la organización del conjunto de la inspección del sistema.

Como se muestra en la Figura 96, los dos modelos están relacionados por las áreas, de tal forma que cada área de inspección puede estar relacionada con uno o más áreas del sistema. Este modelo almacena también los resultados de las distintas inspecciones. Para

³³ Este árbol de producto es una versión adaptada del modelo jerárquico de componentes presentado en esta sección.

ello presenta un bloque denominado *análisis de puntos de inspección* que se asocia a cada área de inspección. Aquí es donde se almacenan los nuevos resultados y los datos asociados después de cada inspección.

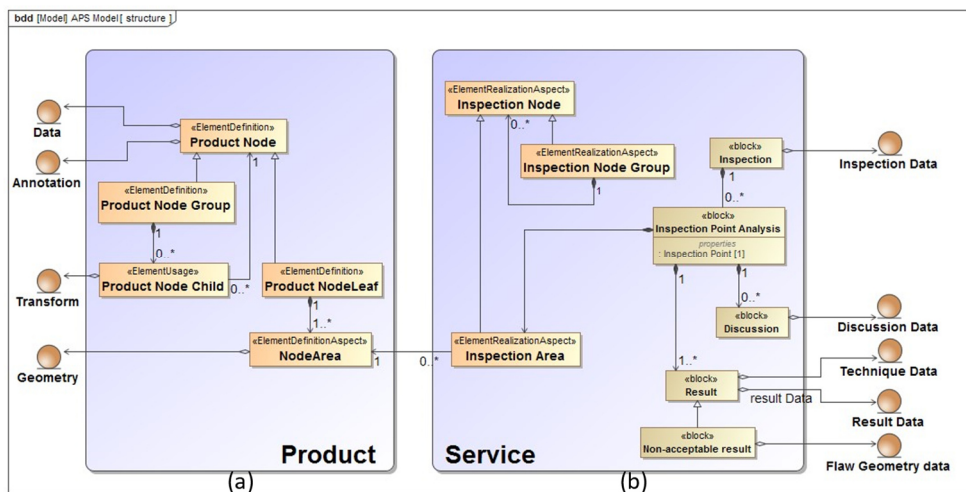


Figura 96. Diagrama del modelo producto-servicio del proyecto UiW.

La integración de estos dos modelos permitió el desarrollo de una aplicación que permitía a los técnicos analizar los resultados de las inspecciones sobre el modelo 3D del sistema de forma colaborativa. Además, al mantener todo el historial de decisiones sobre el producto almacenado junto con su modelo, se evita el riesgo de fragmentación de la información.

5.5 Modelo de interacción 3D

A la propuesta de modelado presentada en las secciones anteriores, añadimos ahora la posibilidad de incluir la información que se ha visto relevante en los capítulos 2 y 3 para mejorar la interacción con los objetos 3D. En esta sección, se presentará en detalle la información crucial que, según nuestra investigación, resulta fundamental vincular

al modelo jerárquico de componentes con el fin de mejorar la usabilidad de la interacción. Aunque estos elementos han sido identificados a lo largo del desarrollo de varias técnicas expuestas en capítulos anteriores de esta Tesis, en este apartado se aspira a realizar una generalización que permita su aplicación en una amplia gama de contextos. Se busca así maximizar su utilidad en diversos casos y escenarios. La Figura 97 muestra un diagrama de este modelo de datos que se incorporaría al modelo jerárquico de componentes presentado previamente y que va a ser explicado a continuación.

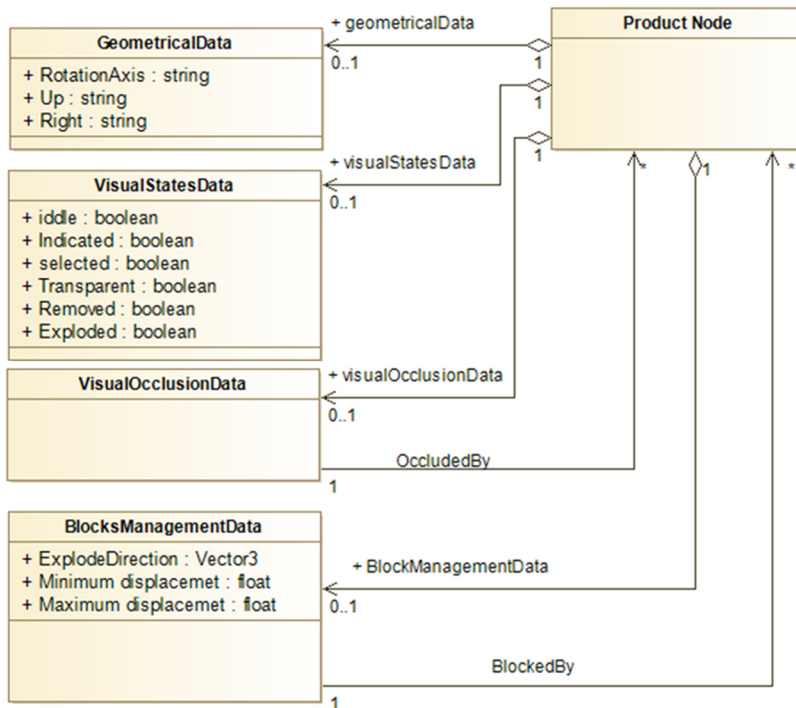


Figura 97. Diagrama del modelo de datos para la interacción 3D.

Navegación

Las técnicas propuestas en el capítulo 3 persiguen ajustarse a la geometría de los objetos mediante sus dimensiones geométricas y el eje de rotación preferido en el modelo mental del usuario. En consecuencia, el modelo de datos debe incluir información sobre este eje de rotación. Una implementación mínima requeriría incorporar esta información únicamente a nivel del nodo raíz del árbol de componentes³⁴. Sin embargo, una implementación completa debería contemplar este dato para cada nodo de producto del árbol jerárquico.

Esto permitiría que la técnica de navegación se adapte a la geometría, tanto en la visualización del sistema en su totalidad como en representaciones aisladas de sus partes, como se ilustra en la técnica de aislamiento presentada en el capítulo 4.5. Tomemos como ejemplo un vehículo, que tiene un eje intrínseco vertical para ser visualizado sobre el suelo, pero sus ruedas pueden poseer un eje intrínseco coincidente con su eje de rotación. Esta disposición facilitaría la inspección de las ruedas cuando se aíslan del resto del sistema.

Además, se considera valioso añadir dos parámetros más, que indique la parte frontal y superior de cada subsistema³⁵, vinculándose también esta información a cada nodo de producto del árbol. Aunque algunos objetos pueden ser totalmente simétricos, lo habitual es que exista una preferencia en el modelo mental del usuario al posicionar el objeto 3D en la pantalla.

³⁴ Este es el caso de la implementación realizada en esta tesis.

³⁵ De nuevo en esta tesis se ha realizado una implementación reducida. Esta información está vinculada solo al nodo raíz del sistema mediante un cuaternión de rotación.

Selección jerárquica

El algoritmo propuesto en la sección 4.4 se basa en la existencia de un modelo jerárquico de componentes, similar al presentado en este capítulo. En nuestra propuesta, se habilita la selección en cualquier nivel de la jerarquía, ya sea mediante una representación textual del modelo o mediante *ray-casting* en la representación 3D del sistema³⁶. De este modo, la selección de un nodo del producto implica la selección de todas las áreas descendientes al mismo.

Para lograr estas funcionalidades, las acciones del usuario se traducen en consultas al modelo, cuyos resultados conducen a las acciones correspondientes. Supongamos que se ha decidido el nivel jerárquico para las acciones de selección, cada vez que un usuario realiza una indicación o selección mediante *ray-casting*, el sistema de interacción realiza una consulta al modelo para identificar y resaltar todas las áreas involucradas. Por ejemplo, si se eligen nodos de alto nivel de los subsistemas de un vehículo (como tracción, eléctrico, carrocería, etc.), apuntar a la geometría de una rueda resultaría en la selección de todo el sistema de tracción, ya que es ese nodo de alto nivel es el que activaría.

Además, se requiere asociar al modelo información que permita gestionar los distintos estados visuales de cada parte del sistema. Esto incluye tanto los estados de selección (inactivo, indicado, seleccionado) como los necesarios para el funcionamiento de las técnicas de gestión de oclusiones (transparente, borrado, explotado). Esta información se enlazará con cada nodo del producto. Asimismo, para llevar a cabo esta gestión, se implementará una máquina de

³⁶ En la implementación realizada en esta tesis la selección mediante *ray-casting* está limitada a dos niveles dentro de cada rama del árbol. Se puede seleccionar o bien a nivel de área o bien a nivel de un nodo que se considere relevante.

estados que operará consultando la información vinculada al modelo. En Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Garre-Del-Olmo, et al. (2018) se presentó una implementación de la gestión de eventos de dicha máquina de estados.

Occlusion Management Model

Esta parte del modelo contendrá la información necesaria para la implementación de las técnicas de gestión de oclusiones como las propuestas en esta Tesis. Es decir, técnicas que hagan uso de datos contenidos en el modelo para realizar sus tareas de forma más eficiente y adaptándose al caso particular de cada sistema.

Se plantea que la naturaleza de la información en este modelo puede ser de dos tipos: información de carácter permanente, independiente de la interacción, e información generada en tiempo real según parámetros de la interacción, como el punto de vista de la cámara, la selección, el tipo de visualización (VR o AR) u otros.

Un ejemplo de información generada en tiempo real sería la *transparencia adaptativa*, que, según el punto de vista de la cámara, determina qué partes ocluyen a otras de interés. El algoritmo presentado en la Figura 89 determina mediante *ray-casting* que áreas ocluyen la visión y consulta el modelo para conocer qué componentes del sistema (nodos hoja) corresponden a estas áreas³⁷. Esta información podría ser almacenada en el modelo para su utilización en otras técnicas de gestión de oclusiones. En tal caso, la información debería registrarse a nivel de nodo, permitiendo que cada nodo del

³⁷ Nuestras propuestas siempre aplican los efectos visuales a componentes completo, nunca a partes. De esta forma se busca maximizar la comprensión de las relaciones espaciales entre las partes del sistema.

producto conserve registro de qué otros nodos hoja están bloqueando su visión en ese momento.

En cuanto a la información permanente, se refiere a datos inherentes al sistema y no vinculados a un estado puntual de la interacción. Esta información se introducirá en el modelo y será mantenida por los diseñadores del sistema. Este tipo de información se distribuirá a lo largo de la estructura de datos vinculada a los nodos del producto.

Un ejemplo de esta información es la referente al ensamblado y desensamblado³⁸, empleada en la técnica de vistas explotadas desarrollada en esta Tesis en el capítulo 4. En nuestro desarrollo, esta información indicará las direcciones de movimientos de las distintas partes, los desplazamientos mínimo y máximo, así como los elementos que bloquean el movimiento de cada parte. Esta información estará contenida en lo que denominamos el modelo de gestión de bloqueos (*Blocks Management Model*).

5.6 Conclusiones

El presente capítulo ha propuesto una estructura detallada y articulada de modelos de datos esenciales para mejorar la usabilidad en entornos de interacción 3D en sistemas complejos. La síntesis y generalización de múltiples técnicas desarrolladas a lo largo de esta tesis han llevado a la formulación de un modelo jerárquico de componentes, un modelo de interacción 3D y un modelo de gestión de oclusiones.

³⁸ Aunque esta información pudiera ser determinado mediante algoritmos automáticos, quizás en un futuro no muy lejano basados en IA, no creemos que esta dependa del estado de la interacción.

El modelo jerárquico de componentes se posiciona como el eje central, permitiendo organizar y relacionar toda la información relevante de un sistema complejo. Este árbol estructurado no solo captura la estructura física/lógica del sistema, sino que también vincula componentes, subsistemas, áreas y nodos hojas, proveyendo una comprensión global del sistema.

Por otro lado, el modelo de interacción 3D incorpora datos cruciales para mejorar la usabilidad y la adaptabilidad de las técnicas de navegación y selección jerárquica propuestas en capítulos previos. La información sobre ejes de rotación, direcciones frontales y superiores de los subsistemas es fundamental para ajustar la interacción a las preferencias del usuario.

Finalmente, el modelo de gestión de oclusiones contempla datos permanentes y generados en tiempo real. Este modelo no solo abarca la información inherente al sistema, como el ensamblado y desensamblado de componentes, sino que también integra información dinámica, como la transparencia adaptativa según el punto de vista del usuario.

Con respecto a la evolución de todo lo expuesto en este capítulo, una versión inicial del modelo jerárquico de componentes sé presento en la conferencia EuroVR 2015 (González-toledo et al., 2015), acompañada de un esbozo sobre la conexión entre varios modelos de datos. La concepción de un modelo industrial unificado, basado en las metodologías MBSE, fue expuesta en el libro “*Dynamics of Long-Life Assets*” (Grösser et al., 2017), un fruto del trabajo realizado en el proyecto UiW. Particularmente, el autor contribuyó al capítulo titulado “*Collaborative Management of Inspection Results in Power Plant Turbines*” (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, et al., 2017), donde se mostró una versión más avanzada del modelo jerárquico de componentes y su conexión con otros modelos de datos. La versión

más completa y actualizada hasta la fecha se presentó en la conferencia EuroVR2016 (González-Toledo Daniel, 2016) y posteriormente se detalló en el artículo de revista “*HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models*” (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Garre-Del-Olmo, et al., 2018). No obstante, este trabajo no profundizó en el modelo de datos para la interacción. Como resultado, el enfoque presentado en este apartado ha sido sometido a evaluaciones durante su integración en diversas herramientas (aplicaciones web, móviles y autónomas) a lo largo del desarrollo de los proyectos UiW y PLUGGY³⁹. A medida que se ha desplegado en estas herramientas, el modelo ha sido sometido a correcciones, refinamientos y validaciones continuas, demostrando su fiabilidad y utilidad en todos los entornos en los que ha sido implementado.

En resumen, aunque esta tesis solo ha desarrollado unos pocos elementos de los que conforman la interacción 3D completa, creemos que la integración de estos modelos proporciona un marco estructurado para mejorar la usabilidad y la interactividad en entornos 3D para sistemas complejos. Esta estructura jerárquica y articulada de modelos de datos puede ser adaptada y generalizada para una amplia gama de contextos, permitiendo así un enfoque escalable y versátil para mejorar la interacción 3D en este tipo de sistemas.

³⁹ Se pueden visualizar videos de la integración de nuestro trabajo con las aplicaciones de PLUGGY en el siguiente enlace <https://www.pluggy-project.eu/pluggy3d/>. Además, se puede acceder directamente a estas aplicaciones a través de la plataforma desarrollada en <https://pluggy.eu/>. Asimismo, existe la posibilidad de acceder a un demostrador web en <https://proyectos.diana.uma.es/hom3r/>.

Capítulo 6

Conclusiones

La presente tesis doctoral ha abordado la mejora de la usabilidad en entornos de interacción 3D con objetos complejos, especialmente en lo que respecta a técnicas de navegación, gestión de oclusiones y modelos de datos, con el propósito de facilitar la tarea de inspección visual de dichos objetos.

Nuestro trabajo en el campo de las técnicas de manipulación se ha focalizado en aquellas fundamentadas en el concepto de *virtual trackball*, específicamente en aquellas que separan la rotación del objeto alrededor del eje vertical del control de la inclinación de dicho eje (*Two-axis valuator*). Inicialmente, exploramos si la elección adecuada de un eje fijo en la interacción, que podría ser diferente al vertical, podría potenciar las tareas de inspección en entornos 3D. Al resaltar la importancia de fijar un eje de interacción adaptado a la naturaleza del objeto, dimos un paso adicional al intentar ajustar la manipulación del objeto a sus proporciones. En este contexto, investigamos diversas técnicas basadas en elipsoides que se adaptan a la *bounding box* de los objetos. Los resultados obtenidos evidencian que tanto la navegación esférica como la elipsoidal proporcionan mejoras significativas en la eficiencia y la usabilidad percibida al inspeccionar áreas laterales y partes ocultas de objetos virtuales en comparación con las técnicas basadas en una *virtual trackball* esférica clásica. Como contribución significativa de esta tesis, hemos desarrollado una formulación matemática completa de estas técnicas propuestas, respaldada por su validación experimental.

Además de lo anterior, se han desarrollado varias estrategias para abordar la visualización de partes ocultas en los objetos

inspeccionados. Éstas incluyen métodos jerárquicos de selección, eliminación, aislamiento, transparencia adaptativa y vistas explotadas. Cada técnica tiene ventajas y limitaciones específicas, y la combinación de estas estrategias ofrece una solución más completa para resolver situaciones de oclusión.

Pues bien, todas estas técnicas confluyen finalmente en una propuesta estratégica de modelo jerárquico de componentes, un modelo de interacción 3D y un modelo de gestión de oclusiones. Estos modelos buscan organizar la información de sistemas complejos, mejorar la usabilidad y adaptabilidad de las técnicas de interacción, así como manejar eficientemente la visualización de partes ocultas en objetos 3D.

En conjunto, la integración de estos modelos y técnicas proporciona un marco estructurado y escalable para mejorar la usabilidad y la interacción 3D con objetos complejos. Estos enfoques fueron desarrollados y evaluados en proyectos de investigación, mostrando su versatilidad y fiabilidad en diversos entornos, desde aplicaciones industriales hasta contextos web, móviles y autónomos.

En resumen, como conclusión final de esta tesis, afirmamos que el modelado de objetos 3D, incorporando información no estrictamente geométrica y considerando las relaciones entre las diferentes partes del objeto, puede utilizarse para mejorar la interacción con el mismo. La combinación de estrategias de navegación, gestión de oclusiones y modelos de datos ofrece un enfoque integral para mejorar la interacción 3D en sistemas complejos, proporcionando una comprensión más completa y una experiencia más intuitiva para los usuarios al trabajar con objetos virtuales complejos.

6.1 Contribuciones

En esta tesis se han llevado a cabo distintos estudios y avances en el ámbito de las interacciones en entornos 3D para sistemas complejos. A través de los diferentes capítulos, se han alcanzado conclusiones valiosas que han propuesto soluciones innovadoras para mejorar la usabilidad, eficiencia y adaptabilidad en la interacción con objetos virtuales.

- El capítulo 2 confirmó la importancia de la selección adecuada de un eje fijo en el diseño de técnicas de interacción basadas en *virtual trackball*. Se demostró que esta selección puede mejorar la navegación y la inspección de objetos virtuales al hacer que la interacción sea más natural y eficiente. Este hallazgo permite replantear el enfoque convencional hacia la navegación 3D, sugiriendo que la alineación del eje fijo con el objeto inspeccionado puede aumentar significativamente la usabilidad. Estos resultados fueron publicados en el artículo de revista titulado “*Still room for improvement in traditional 3D interaction: selecting the fixed axis in the virtual trackball*” (Gonzalez-Toledo et al., 2022b).
- El capítulo 3 introdujo dos técnicas novedosas de navegación basadas en elipsoides virtuales, ampliando así el repertorio de técnicas dentro de la familia de Virtual Trackball. Estas técnicas, adaptadas al eje de rotación intrínseco del objeto, y a las proporciones del mismo, buscan un enfoque más intuitivo y eficiente para interactuar con objetos 3D con baja esfericidad. La técnica de interacción basada en esferoides fue evaluada, demostrando su excelente rendimiento y mejora de usabilidad cuando se emplea con objetos oblongos con un eje prioritario en comparación con las técnicas esféricas tradicionales. En el artículo de revista titulado “*The Spheroidal Trackball: generalizing the Fixed Trackball for virtual camera navigation*”(Gonzalez-Toledo

et al., 2024) se presentó tanto el desarrollo teórico como la evaluación de nuestra técnica de interacción basada en esferoides.

- En el capítulo 4, se abordó la gestión de oclusiones, presentando diversas estrategias para abordar este desafío en objetos 3D complejos. Se propusieron técnicas de selección jerárquica, eliminación, aislamiento, transparencia adaptativa y vistas explotadas. Estas estrategias ofrecen soluciones para identificar, visualizar y seleccionar partes ocultas, cada una con sus ventajas y limitaciones. Se resaltó la importancia de combinar estas técnicas con la información contenida en el modelo del producto, buscando adaptarse a situaciones específicas y maximizar la comprensión del objeto sin sacrificar la visibilidad. Estos resultados se presentaron en el artículo de revista titulado “*HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models*” (Gonzalez-Toledo, Cuevas-Rodriguez, Garre-Del-Olmo, et al., 2018).
- Finalmente, el capítulo 5 propuso una estructura de modelos de sistemas, con énfasis en un modelo jerárquico de componentes, un modelo de interacción 3D y un modelo de gestión de oclusiones. Esta estructura busca integrar información diversa y permitir una interacción 3D adaptada a modelos específicos, proporcionando un marco estructurado para mejorar la interacción en entornos 3D para sistemas complejos.

En paralelo, a lo largo de esta tesis, se ha concebido y desarrollado un visor 3D especializado en modelos de productos jerárquicos complejos, denominado HOM3R (*Hierarchical prOduct Model 3D vieweR*). Este visor fue evolucionando, desde su concepción inicial hasta transformarse en varias piezas de software distintas. En primer lugar, se ha creado una librería en lenguaje C#, denominada *HOM3R-Engine*, que implementa las técnicas de interacción y gestión de oclusiones desarrolladas, aprovechando el modelo de datos presentado

en este trabajo. Esta librería capacita a las aplicaciones que la integran para acceder a todas las funcionalidades y características que se han presentado en esta tesis para manejar modelos 3D jerárquicos complejos. Esta librería ha sido publicada como software de código abierto, puede encontrarse en el siguiente repositorio <https://github.com/GrupoDiana/hom3r-engine>.

Por otra parte, en nuestro trabajo se han ido desarrollando diferentes versiones del visualizador HOM3R, adaptadas para distintas aplicaciones y plataformas, las cuales utilizan la librería desarrollada previamente. Estos desarrollos han sido validados a lo largo de los proyectos Use-It-Wisely y PLUGGY⁴⁰ en plataformas de escritorio, web y móviles, tanto en entornos de realidad aumentada como de realidad virtual. Han sido probados con diferentes tipos de objetos, lo que ha permitido comprobar su versatilidad y adaptabilidad a múltiples entornos y dispositivos. El código del visualizador se ha publicado también como software de código abierto y es posible su descargar en el siguiente repositorio <https://github.com/GrupoDiana/hom3r-viewer>.

Adicionalmente, se ha implementado un demostrador web que muestra las capacidades del visor HOM3R, disponible en la página de promoción del visor a través de la siguiente URL <https://proyectos.diana.uma.es/hom3r/>. Este recurso permite a los usuarios experimentar y explorar las funcionalidades del visor en línea, ofreciendo una muestra de su potencial en un entorno accesible a través de internet.

⁴⁰ <https://www.pluggy-project.eu/pluggy3d/>

6.2 Trabajos futuros

Esta investigación doctoral, enfocada en optimizar la usabilidad en la interacción 3D con objetos complejos, abre diversas líneas de trabajo y exploración para futuras investigaciones.

- Una perspectiva de investigación pendiente se centra en la evaluación de la técnica de navegación basada en elipsoides triaxiales, comparándola con la aproximación clásica basada en esferas. El objetivo es determinar si la navegación basada en elipsoides triaxiales ofrece mejoras significativas en la usabilidad y si tales mejoras justifican el incremento de complejidad inherente a esta técnica.
- Un estudio adicional se propone para realizar una validación formal del algoritmo de mapeo de gestos del dispositivo basado en la proporción del objeto en pantalla, presentado en la sección 3.2.3. Esta investigación busca comparar nuestro algoritmo con otras metodologías documentadas en la literatura y/o con técnicas utilizadas en aplicaciones comerciales.
- En el ámbito de la gestión de oclusiones, se plantea la exploración de técnicas adicionales que puedan adaptarse y simplificarse para productos complejos, aprovechando la información contenida en los modelos.
- Otra área de interés es la investigación de técnicas de representación de información sobre modelos 3D que aprovechen los datos contenidos en los modelos para mejorar la usabilidad. Aunque se inició este camino durante el desarrollo de la tesis, desarrollando una técnica de etiquetas 3D, vinculado a los proyectos Use-It-Wisely y PLUGGY, se sugiere una exploración más exhaustiva para desarrollar enfoques innovadores.
- En relación con los modelos, son necesarios estudios adicionales para lograr modelos unificados y que estos integren más aspectos

de la interacción en entornos 3D, alineándose con la propuesta inicial de esta investigación.

6.3 Lista de publicaciones

6.3.1 Revistas

Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodríguez, M., Garre-Del-Olmo, C., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2018). *HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models*. Journal of Virtual Reality and Broadcasting, 14(3). <https://doi.org/10.20385/1860-2037/14.2017.3>

Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodríguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2022). *Still room for improvement in traditional 3D interaction: selecting the fixed axis in the virtual trackball*. Visual Computer. <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02394-x2016>.

Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodríguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2024). *The Spheroidal Trackball: generalizing the Fixed Trackball for virtual camera navigation*. Visual Computer. <https://doi.org/10.1007/s00371-023-03250-w>

6.3.2 Capítulos de libros

Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodríguez, M., Flores-Holgado, S. (2017). *Collaborative Management of Inspection Results in Power Plant Turbines*. In: Grösser, S., Reyes-Lecuona, A., Granholm, G. (eds) Dynamics of Long-Life Assets. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45438-2_11

6.3.3 Congresos Internacionales

González-toledo, D., Cuevas-rodríguez, M., Garre, C., Molina-tanco, L., & Reyes-lecuona, A. (2015). *A Tool for Collaborative Decision Making on Service Information Linked to 3D Geometry of Complex Hierarchical Products*. Proceedings of EuroVR2015, 1–6.

Daniel Gonzalez-Toledo, María Cuevas-Rodríguez, Carlos Garre-Del-Olmo, Luis Molina-Tanco and Arcadio Reyes-Lecuona. *HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models*. Proceedings of EuroVR2016, November 2016, Athens. Part of ISBN: 978-618-80348-3-9.

González-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2018). *3D Object Rotation Using Virtual Trackball with Fixed Reference Axis*. Proceeding of EuroVR2018, 1, 3–5. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2593170>.

Reyes-Lecuona, A., **Gonzalez-Toledo, D.**, Cuevas-Rodriguez, M., Herruzo-torrico, M. L., García-puyol, A., & Molina-tanco, L. (2019). *PLUGGY3D. Augmented Reality for cultural heritage*. Proceedings of the 16th Annual EuroVR Conference - 2019, 103–106.

6.3.4 Otras publicaciones no relacionadas directamente con el tema del doctorado

Cuevas-rodriguez, M., **Gonzalez-toledo, D.**, Molina-tanco, L., & Reyes-lecuona, A. (2015). *Contributing to VRPN with a new server for haptic devices*. Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST, 13-15-Nove, 2821639. <https://doi.org/10.1145/2821592.2821639>

Cuevas-Rodriguez, M., **Gonzalez-Toledo, D.**, de La Rubia-Cuestas, E., Garre, C., Molina-Tanco, L., Reyes-Lecuona, A., Poirier-Quinot, D., & Picinali, L. (2017). *An open-source audio renderer for 3D audio with hearing loss and hearing aid simulations*. 142nd Convention Audio Engineering Society, 1–8.

Cuevas-Rodriguez, M., **Gonzalez-Toledo, D.**, la Rubia-Cuestas, E. de, Garre, C., Molina-Tanco, L., Reyes-Lecuona, A., Poirier-Quinot, D., & Picinali, L. (2018). *The 3D Tune-In Toolkit - 3D audio spatialiser, hearing loss and hearing aid simulations*. 2018 IEEE 4th VR Workshop on Sonic Interactions for Virtual Environments, SIVE 2018, 1–3. <https://doi.org/10.1109/SIVE.2018.8577076>

Cuevas-Rodríguez, M., Picinali, L., **González-Toledo, D.**, Garre, C., de la Rubia-Cuestas, E., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2019). *3D Tune-In Toolkit: An open-source library for real-time binaural spatialisation*. PLOS ONE, 14(3), e0211899. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211899>

Picinali, L., Cuevas-Rodriguez, M., **Gonzalez-Toledo, D.**, & Reyes-Lecuona, A. (2019). *Speech-in-noise performances in virtual cocktail party using different non-individual Head Related Transfer Functions*. Proceeding of the 23rd International Congress on Acoustic, 1, 2158–2159. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000333.pdf>

Reyes-Lecuona, A., Molina-Tanco, L., Cuevas-Rodríguez, M., & **González-Toledo, D.** (2020). *Interacción 3D y Realidad Virtual en la Universidad de Málaga*. Presentación del grupo 3DI-DIANA. Interaccion - Revista Digital de AIPO, 85–88.

Cuevas-Rodriguez, M., **Gonzalez-Toledo, D.**, Reyes-Lecuona, A., & Picinali, L. (2021). *Impact of non-individualised head related transfer functions on speech-in-noise performances within a*

synthesised virtual environment. The Journal of the Acoustical Society of America, 149(4), 2573-2586.

<https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/10.0004220>

Márquez-Moncada, A. Bottcher, H.L., **Gonzalez-Toledo, D.**, Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L., M., Reyes-Lecuona, A. *Influencia del Audio 3D en la Percepción de la Ganancia de Rotación en un Entorno Virtual. Un Estudio Piloto*, en las actas del XXI Congreso Internacional Interacción Persona-Ordenador, Málaga 2021, pág. 61. UMA Editorial. https://www.interaccion2021.uma.es/wp-content/uploads/2021/pdf/actas/i2021_Actas_Propias.pdf

Reyes-Lecuona, A., Márquez-Moncada, A., Hauke Luis, B., **González-Toledo, D.**, Cuevas-Rodriguez, M., & Molina-Tanco, L. (2021). *Audio Binaural y Ganancia de Rotación en Entornos Virtuales Binaural Audio and Rotation Gain in Virtual Environments*. Interaccion - Revista Digital de AIPO, 2(2), 54-62.

Arrebola, F., **González-Toledo, D.**, García-Jiménez, P., Molina-Tanco, L., Cuevas-Rodríguez, M., & Reyes-Lecuona, A. (2022). *Simulación En Tiempo Real De Las Reflexiones Tempranas Mediante El Método De Las Imágenes*. 53º Congreso Español De Acústica XII Congreso Ibérico De Acústica.

Cuevas-Rodríguez, María, **Gonzalez-Toledo, Daniel**, Gutierrez-Parera, Pablo, Reyes-Lecuona, Arcadio. (2023). *An experiment replication on dynamic 3D sound localization using Auditory Virtual Reality*. Forum Acusticum Conference 2023 - 10th Convention EAAAt, Turin, Italy. 2023. URL: <https://appfa2023.silssystem.solutions/atti/000744.pdf>

Gonzalez-Toledo, Daniel, Molina-Tanco, Luis, Cuevas-Rodríguez, María, Majdak, Piotr, Reyes-Lecuona, Arcadio. *The Binaural Rendering Toolbox. A Virtual Laboratory For Reproducible*

Research In Psychoacoustics. Forum Acusticum Conference 2023 - 10th Convention EAAAt, Turin, Italy. 2023. URL: <https://appfa2023.silssystem.solutions/atti/001042.pdf>

Daniel González-Toledo, María Cuevas-Rodríguez, Thibault Vicente, Lorenzo Picinali, Luis Molina-Tanco, Arcadio Reyes-Lecuona; *Spatial release from masking in the median plane with non-native speakers using individual and mannequin head related transfer functions*. *J. Acoust. Soc. Am.* 1 January 2024; 155 (1): 284–293. <https://doi.org/10.1121/10.0024239>

6.4 Otras actividades de investigación

- Miembro del comité organizador del congreso internacional XXI Congreso Internacional Interacción Persona-Ordenador (Interacción 20/21).
- Editor de las actas propias del congreso de internacional XXI Congreso Internacional Interacción Persona-Ordenador (Interacción 20/21).

6.5 Proyectos

El trabajo presentado en esta tesis ha sido parcialmente financiado por los proyectos *Use-It-Wisely*⁴¹ y *PLUGGY*⁴² y por el grupo de investigación DIANA de la Universidad de Málaga.

⁴¹ <https://cordis.europa.eu/project/id/609027>

⁴² <https://www.pluggy-project.eu/>



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Apéndice A

Formularios y autorizaciones del comité ético

Este apéndice muestra los documentos proporcionados a los participantes de los experimentos presentados en los capítulos 2 y 3, así como las solicitudes enviadas al comité ético de la Universidad de Málaga y la carta de aceptación.

A.1 Estudio experimental sobre la importancia de la selección del eje de rotación

A.1.1 Consentimiento informado

Universidad de Málaga

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Departamento de Tecnología Electrónica

DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

D./Dña , mayor de edad y
con DNI nº,

Manifiesta:

Que acepta participar como sujeto de investigación en este estudio realizado en la Universidad de Málaga por el grupo de investigación 3DI-DIANA.

Que entiende cómo se llevará a cabo la tarea experimental necesaria para este estudio.

Que sabe que puede abandonar el experimento en cualquier momento, sin necesidad de ofrecer explicaciones, y sin que ello le suponga ningún perjuicio.

Que comprende y consiente que todos los datos que proporcione y se obtengan sean almacenados en una base de datos informática manteniéndose la confidencialidad de acuerdo a la legislación vigente de protección de datos (Ley Orgánica 3/2018) y que dichos datos se usarán estrictamente para la investigación.

Que con la firma de este documento expresa que ha leído, entendido y que declara su consentimiento para todo lo anterior.

Fecha y firma del participante Fecha y firma del investigador

A.1.2 Hoja informativa entregada a los participantes

Título del estudio: *Estudio de la importancia del eje en las técnicas de rotación de objetos 3D*

Buenos días, gracias por participar en este experimento.

Se trata de un experimento para evaluar diferentes variantes de una técnica de manipulación de objetos 3D. Vas a probar cuatro diferentes escenarios en el que se usan cuatro variaciones de esta técnica.

Para ello te pedimos que realices lo que llamamos una **tarea de inspección**. En este caso, verás una esfera que tiene una serie de agujeros. En uno de ellos hay una bola de color amarillo. Tu tarea consiste en **manipular la esfera para localizar la bola amarilla y llevarla a la mirilla** que hay en el centro de la pantalla. Una vez que lo hayas hecho, la mirilla cambiará de color y, transcurrido un segundo, la bola desaparecerá y esto irá acompañado de un sonido. Podrás entonces pasar a buscar la siguiente bola. La siguiente bola aparecerá en el lado opuesto de la esfera de manera aleatoria, sin ningún patrón. En total, debes encontrar 20 bolas de forma consecutiva, y en la parte superior derecha, verás un contador que te indica cuántas bolas te queda por encontrar.

IMPORTANTE: queremos saber **qué técnica es más eficaz**. Para ello, mediremos el tiempo que tardas en completar la tarea, por lo que te pedimos que realices la tarea lo más rápido que puedas.

Al principio de cada escenario, **tendrás la posibilidad de entrenar** el tiempo que desees con la técnica que te ha tocado. Entrena el tiempo que consideres necesario para sentirte cómodo/a con la interacción.

Cuando pienses que estás listo/a pulsa el botón para comenzar el experimento.

Al terminar cada uno de los escenarios, te pediremos que contestes un breve **cuestionario** de 16 preguntas en la propia aplicación y, entre escenario y escenario, nos tomaremos un descanso. Debes parar a descansar entre cada escenario, así que, avísanos cuando acabes, te preguntaremos que tal vas y cuando te sientas listo pasaremos al siguiente escenario.

IMPORTANTE: Estamos buscando *qué técnica es la más eficaz*, así que, si quieres parar, porque tienes alguna duda o pregunta, tienes que hacerlo durante los descansos entre escenarios o durante la fase de entrenamiento.

Al principio y al final, te pediremos que rellenes otro cuestionario de 6 preguntas y una hoja con datos demográficos anónimos.

Por último, queremos resaltar que los datos que vamos a obtener sólo se usarán de forma anónima. Nunca se asociará tu nombre a ninguno de las medidas o respuestas a los cuestionarios. Asimismo, debes saber que puedes parar la prueba y abandonarla en cualquier momento.

A.1.3 Cuestionario demográfico

Título del estudio: *Estudio de la importancia del eje en las técnicas de rotación de objetos 3D*

Número del participante:

1. Edad:

18 – 29

30 – 39

40 – 49

50 – 59

2. Género:

Mujer Hombre

3. ¿Tiene experiencia previa con manipulación de objetos 3D? Si

la respuesta es sí, indique por favor qué tipo de experiencia:

.....

4. ¿Tiene experiencia previa con videojuegos? Si la respuesta es sí,

indique por favor con qué frecuencia juega:

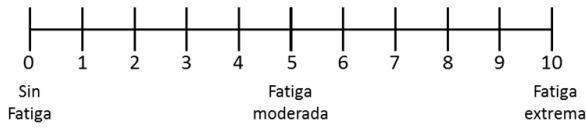
.....

A.1.4 Cuestionario de fatiga

Título del estudio: *Estudio de la importancia del eje en las técnicas de rotación de objetos 3D*
Participante número:

CUESTIONARIO DE FATIGA – ANTES DEL EXPERIMENTO

Ojos



Cuello



Mano



Muñeca



Brazo



Hombro



Participante número:

CUESTIONARIO DE FATIGA – DESPUES DEL EXPERIMENTO

Ojos



Cuello



Mano



Muñeca



Brazo



Hombro



A.1.5 Solicitud al comité ético



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

Fecha de Entrada: N° REGISTRO:

CUESTIONARIO PARA EVALUACIÓN POR EL COMITÉ ÉTICO DE EXPERIMENTACIÓN

Proyectos de investigación con sujetos humanos

Datos del Investigador/a Principal o Responsable:

Nombre y Apellidos: Luis Molina Tanco		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Profesor Contratado Doctor		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:

Datos del Personal adscrito al proyecto:

Nombre y Apellidos: Daniel Gonzalez Toledo		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Investigadora con cargo a proyecto		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos: Maria Cuevas Rodriguez		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad:	
Puesto/Cargo: Investigador con cargo a proyecto		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos: Arcadio Reyes Lecuona		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Titular de Universidad		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos:		DNI:
Dpto.:	Centro/Facultad:	
Puesto/Cargo:		
Dirección:		
Teléfono:	Fax:	e-mail:

Título del proyecto:

Breve descripción de las hipótesis, objetivos y plan de trabajo (máximo 500 caracteres)

El objetivo principal es el estudio de diferentes técnicas de interacción en entorno 3D virtual a través del uso del ratón y la pantalla táctil, evaluando la importancia de seleccionar un eje de referencia de forma coherente con el eje intrínseco del objeto con el que se esté interaccionando. Nuestra hipótesis es que la técnica que ofrezca consistencia entre ambos ejes beneficiará tanto al rendimiento como a la experiencia del usuario. Además de este estudio, previamente se realizará un estudio piloto, y posteriormente el análisis de resultados.



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

Fuente de financiación: (Detallar convocatoria pública o financiación privada y especificar si es una convocatoria competitiva y fuente de publicación.)

Este estudio se llevará a cabo dentro del marco del proyecto europeo Pluggy (80625/58.8018)

Breve descripción de la metodología del estudio (En caso de que la metodología esté publicada adjuntar referencias bibliográficas, preferiblemente del equipo investigador) (máximo 500 caracteres)

Se reclutarán sujetos entre los estudiantes de la E.T.S.I. de Telecomunicación. Se le pedirá a cada sujeto que utilice una aplicación en un ordenador y en una tablet. El sujeto realizará una serie de tareas de inspección durante 2 sesiones, una para cada aplicación. Datos que se recogerán: tiempo de respuesta, números de acciones empleadas, cuestionarios de usabilidad (SUS) y carga de trabajo (NASA TLX). El tiempo estimado de la prueba es de 20 minutos.

[1] Bade, R., Ritter, F., Preim, B.: Usability comparison of mouse-based interaction techniques for predictable 3d rotation.

Cuestionario

A. Se trata de investigaciones que implique intervenciones en humanos, incluyendo toma de muestras biológicas?
SI NO

En caso afirmativo

1. ¿Se garantiza que la participación de los sujetos experimentales en la práctica es voluntaria y libre?
SI NO
 2. ¿Se garantiza la confidencialidad de los datos?
SI NO
 3. En el consentimiento informado:
 - ¿Se hace explícito el compromiso de confidencialidad ante los sujetos que participan en el estudio?
SI NO
 - ¿Se informa adecuadamente a los sujetos del procedimiento y los riesgos o molestias que pudieran derivarse de la práctica y la forma en que son controlados o mitigados?
SI NO
 - ¿Se informa de las medidas para asegurar una compensación adecuada si sufre algún daño o molestia causada por la investigación?
SI NO
 - ¿Se informa de la posibilidad de ser informado, si así lo desea, de los datos que se obtengan durante la investigación y la forma de obtener dicha información?
SI NO
- (El CEUMA podrá en todo momento solicitar información sobre el consentimiento informado y la hoja de información a los sujetos).**
4. ¿Participan personas especialmente vulnerables, como menores de edad, ancianos, incapacitados, personas con trastornos mentales, etc.?
SI NO



Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
-2- E-mail- vrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

5. ¿En el estudio pueden darse situaciones de autoridad entre el investigador y el sujeto que participa en las mismas?

SI NO

Especifique cómo se garantiza el cumplimiento de todos los requisitos éticos y legales previstos para esta circunstancia. (máximo 1000 caracteres)

6. Indique si existen posibles riesgos o molestias que pudieran derivarse de la práctica y la forma en que son controlados o mitigados.

SI NO

En caso afirmativo explique:

La forma en que son controlados o mitigados: (máximo 500 caracteres)

Si existen procedimientos alternativos de comparable interés que no pueden ser usados en su investigación: (máximo 500 caracteres)

7. ¿Cual es el método de disociación de datos?:
Codificación (Disociación reversible)

SI NO

Anonimización (Disociación irreversible)

SI NO

8. ¿Se realizan pruebas de tipo genético?

SI NO



EFQM
Committed to excellence



AGENCIA NACIONAL DE EVALUACIÓN
DE LA CALIDAD Y ACREDITACIÓN

Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47

-3-

E-mail- vinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es





UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

En caso afirmativo indicar si se cuenta con una persona responsable de informar sobre los resultados al paciente. (máximo 100 caracteres)

B. ¿Se trata de investigaciones que implique Investigación con muestras biológicas almacenadas?

SI NO

En caso afirmativo

9. ¿Se necesita nuevo consentimiento para esta investigación?

SI NO

10. ¿Cual es el método de disociación de datos?

Codificación (Disociación reversible)

SI NO

Anonimización (Disociación irreversible)

SI NO

C. ¿Se trata de investigaciones que implique utilización de datos de origen humano?

SI NO

En caso afirmativo

11. ¿Se necesita nuevo consentimiento para esta investigación?

SI NO

12. Cual es el método de disociación de datos:

Codificación (Disociación reversible)

SI NO

Anonimización (Disociación irreversible)

SI NO

EN TODOS LOS CASOS:

13. ¿Se ofrecen incentivos o compensaciones a los sujetos por su participación en los experimentos?

SI NO



EFQM
Committed to excellence



ANECA
AGENCIA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y ACREDITACIÓN

Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47

-4-

E-mail- vrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es





UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

En caso afirmativo indique su naturaleza y cuantía. (máximo 500 caracteres)

14. ¿Se ofrecen incentivos o compensaciones a los investigadores?

SI NO

En caso afirmativo indique su naturaleza y cuantía. (máximo 500 caracteres)

15. ¿Existe algún tipo de contraprestación y/o seguro para los participantes que cubran daños en caso de producirse?.

SI NO

En caso afirmativo indique naturaleza, compañía y cuantía (máximo 500 caracteres)

16. El estudio se realizará en las instalaciones idóneas para llevar a cabo los diseños experimentales.

SI NO

COMPROMISO ESCRITO DEL INVESTIGADOR RESPONSABLE DEL PROYECTO

Título del Proyecto:	Interacción 3D con Objetos Complejos
Investigador Responsable:	Luis Molina Tanco
Departamento:	Tecnología Electrónica



Pabellón de Gobierno, 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
-5- E-mail- vinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

- El investigador principal que firma la propuesta **declara** ser conocedores de la idoneidad de los procedimientos y protocolos que van a realizar relativos a la experimentación con humanos.
Declaran tanto el investigador como el equipo de investigación
- Han tenido en cuenta la información suficiente que asegure la inocuidad o el beneficio para las personas que participan en la experimentación y ha considerado métodos alternativos a la experimentación con humanos que permita de alcanzar conclusiones válidas?.
- Se garantiza la trazabilidad de tejidos y cualquier material biológico de origen humano, para asegurar las normas de calidad y seguridad.
- Han tomado medidas encaminadas a proteger la vida, la salud, la dignidad, la integridad, el derecho a la autodeterminación, la intimidad y la confidencialidad de la información personal de las personas que participan en investigación
- Las acciones sobre las personas que participan en la experimentación están supervisadas por un médico u otro profesional de la salud competente y cualificado apropiadamente. Igualmente, el personal que participa en los procedimientos posee la titulación y tiene la formación adecuada para llevar a cabo las tareas que se les encomienda
- En su caso, se han tomado medidas encaminadas a no dañar el medio ambiente y se procura el bienestar de los sujetos que participan de la investigación.

El investigador abajo firmante declara conocer y atenerse a lo dispuesto en la normativa legal vigente.

Igualmente, asume que el informe del comité de ética de la Universidad de Málaga se referirá únicamente al procedimiento recogido en este impreso, por lo que cualquier modificación, sin solicitar una nueva aprobación por parte del CEUMA, será responsabilidad exclusiva del solicitante.

Fdo:

Málaga, a 14-mayo-2019

DOCUMENTACION ADICIONAL A ADJUNTAR

- A. Si ya se dispone del informe favorable del Comité Ético de Investigación del centro en el cual se llevará a cabo la experimentación o que suministrará las muestras, hay que adjuntar una copia.
- B. En el supuesto de que el Proyecto tenga previsto de emplear muestras biológicas de origen humano, hay que añadir el informe favorable del Banco de Tejidos del centro del cual se obtendrían las muestras. Hay que especificar que la cesión de las mencionadas muestras se hace a un investigador concreto (citarlo) y para un Proyecto concreto (citarlo), y si se trata de muestras anonimizadas o no.
- C. Especificar o adjuntar otros datos o documentos que crea necesarios



Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
-6- E-mail- vrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es



A.1.6 Aprobación del comité ético



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité Ético de Experimentación de la Universidad de Málaga
(CEUMA)

Nº: 529

Nº de Registro CEUMA: 39-2019-H

INFORME DEL COMITÉ ÉTICO DE EXPERIMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

CEUMA

Reunido el Comité Ético de Experimentación en Málaga, entre el 28 de junio y el 12 de julio de 2019 ha evaluado la solicitud del proyecto denominado: **"Interacción 3D con Objetos Complejos"**, cuyo investigador principal es **D. Luis Molina Tranco**.

Una vez examinada la documentación presentada y verificados aquellos aspectos relacionados con la ética y la legislación en materia de investigación que se indican:

-Se cumplen los requisitos necesarios de idoneidad del protocolo en relación con los objetivos del estudio y están justificados los riesgos y molestias previsibles para el sujeto, teniendo en cuenta los beneficios esperados.

- El procedimiento para obtener el consentimiento informado, incluyendo la hoja de información al sujeto son correctos.

- La idoneidad del procedimiento experimental, especialmente la posibilidad de alcanzar conclusiones válidas de acuerdo con los objetivos establecidos.

- La capacidad del investigador principal y sus colaboradores los medios y las instalaciones previstas son apropiados para llevar a cabo dicho estudio.

- El alcance de las compensaciones y motivaciones previstas no interfiere con el respeto a los postulados éticos.

Acuerda por consenso emitir Informe Ético FAVORABLE para dicho proyecto.





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité Ético de Experimentación de la Universidad de Málaga
(CEUMA)

Nº: 529	Nº de Registro CEUMA: 39-2019-H
---------	---------------------------------

Para que así conste D. TEODOMIRO LÓPEZ NAVARRETE, Vicerrector de Investigación y Transferencia y Presidente del Comité Ético de Investigación de la Universidad de Málaga lo firma en Málaga a 15 de julio de 2019.

Fdo: Teodomiro López Navarrete.

Una vez instruido el procedimiento, y en base a lo dispuesto en el artículo 84 de la Ley 30/92, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y Procedimiento Administrativo Común, se le da audiencia para que en un plazo de 10 días, contados a partir de la recepción/publicación del presente informe, pueda formular alegaciones y presentar los documentos y justificaciones que estime pertinentes.



Pabellón de Gobierno, planta 3ª. Campus El Ejido. 29071. Tel.: 952 13 42 04
E-mail- ceuma@uma.es



A.2 Evaluación de la navegación esferoidal

A.2.1 Consentimiento informado

Universidad de Málaga

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Departamento de Tecnología Electrónica

DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

D./Dña , mayor de edad y
con DNI nº

Manifiesta:

Que acepta participar como sujeto de investigación en este estudio realizado en la Universidad de Málaga por el grupo de investigación 3DI-DIANA.

Que entiende cómo se llevará a cabo la tarea experimental necesaria para este estudio.

Que sabe que puede abandonar el experimento en cualquier momento, sin necesidad de ofrecer explicaciones, y sin que ello le suponga ningún perjuicio.

Que comprende y consiente que todos los datos que proporcione y se obtengan sean almacenados en una base de datos informática manteniéndose la confidencialidad de acuerdo a la legislación vigente

de protección de datos (Ley Orgánica 3/2018) y que dichos datos se usarán estrictamente para la investigación.

Que con la firma de este documento expresa que ha leído, entendido y que declara su consentimiento para todo lo anterior.

Fecha y firma del participante Fecha y firma del investigador

A.2.2 Hoja informativa entregada a los participantes

Hoja informativa

Buenos días, y muchas gracias por participar en este experimento.

EL EXPERIMENTO EN GENERAL

Se trata de un experimento para evaluar diferentes variantes de una técnica de manipulación de objetos 3D. El experimento se divide en cuatro bloques diferentes, que iras probando de manera consecutiva, con un breve descanso entre ellos. En total menos de media hora. Para ello usarás una aplicación en un ordenador en la que verás un objeto 3D que puedes mover mediante el uso de un ratón.

IMPORTANTE: queremos saber **qué técnica es más eficaz**. Para ello, mediremos el tiempo que tardas en completar la tarea, por lo que te pedimos que realices la tarea lo más rápido que puedas.

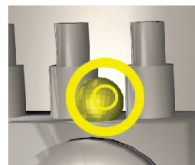
Al principio del experimento te pediremos que rellenes una hoja con datos demográficos anónimos y, por motivos legales, una hoja de consentimiento informado.

LO QUE TE PEDIMOS EN CADA BLOQUE DEL EXPERIMENTO

En cada bloque te vamos a pedir que realices varias veces lo que llamamos una **tarea de inspección y encaje**. Que va a consistir en localizar una esfera colocada en la superficie de un objeto 3D y que la coloques dentro de una mirilla.

Es decir, en la pantalla verás un objeto 3D y una mirilla. Esta mirilla va a estar formada por dos círculos concéntricos formando un anillo y va a aparecer en cualquier lugar de la pantalla.

En la superficie de ese objeto 3D van a ir apareciendo unas esferas de color amarillo. Tu tarea consiste en **manipular (mover) el objeto 3D para localizar la esfera amarilla y encajarla en la mirilla. Para esto, la esfera debe tener un tamaño mayor que el círculo más pequeño de la mirilla y menor que el más grande**. Una vez que lo hayas hecho, la mirilla cambiará de color y pasado unos instantes la esfera desaparecerá. Deberás entonces pasar a buscar la siguiente esfera.



Tu objetivo en cada uno de los bloques consiste en **localizar 16 esferas** de forma consecutiva e ir **colocándolas** dentro de sus mirillas.

INTERACCIÓN

Para **mover el objeto 3D** vas a usar un **ratón** con el que podrás realizar tres gestos distintos:

- Acercar o alejar el objeto mediante la **rueda** del ratón. Esta limitado lo máximo que te puedes alejar del objeto.
- Mover el objeto manteniendo pulsado el **botón izquierdo** mientras mueves el ratón.
- Mover el objeto manteniendo pulsado el **botón central** mientras mueves el ratón. Esta opción solo estará habilitada en alguno de los bloques.

Para dar comienzo la búsqueda de cada una de las esferas debes usa la **tecla ESPACIO**.

FASES

Cada bloque está compuesto por tres fases:

- **Entrenamiento:** Usa esta fase para **familiarizarte con el sistema de navegación** propuesto. Te permite, además, descubrir si está activado o no el botón central del ratón. Pasa en esta fase todo el tiempo que estimes oportuno y cuando te sientas preparado pulsa el **botón de FIN de entrenamiento**.
- **Experimento:** Llegarás a esta fase tras pulsar el botón de fin de entrenamiento. Es en esta fase cuando debes localizar y colocar en sus mirillas las 16 esferas lo más rápido posible. Esto es, una a una.
IMPORTANTE: como se explicado antes queremos saber qué técnica es más eficaz. Para ello, vamos a medir el tiempo que tardas en colocar cada esfera en su mirilla. Este tiempo se mide desde que pulsas el espacio hasta que la mirilla se pone en amarillo. Te pedimos que realices la tarea lo más rápido que puedas.
- **Cuestionarios:** Al terminar cada bloque te pediremos que contestes un breve **cuestionario** de 16 preguntas en la propia aplicación.

Entre bloque y bloque, nos tomaremos un descanso. Debes parar a descansar entre cada bloque, así que, avísanos cuando acabes, te preguntaremos que tal vas y cuando te sientas listo pasaremos al siguiente escenario.

AVISO

Por último, queremos resaltar que los datos que vamos a obtener sólo se usarán de forma anónima. Nunca se asociará tu nombre a ninguno de las medidas o respuestas a los cuestionarios. Asimismo, debes saber que puedes parar la prueba y abandonarla en cualquier momento.

A.2.3 Cuestionario demográfico

Título del estudio: *Estudio comparativo de técnicas de rotación de objetos 3D basadas en elipsoides*

Número del participante:

1. Edad:

18 – 29

30 – 39

40 – 49

50 – 59

2. Género:

Mujer

Hombre

3. ¿Tiene experiencia previa con manipulación de objetos 3D? Si

la respuesta es sí, indique por favor qué tipo de experiencia:

.....

4. ¿Tiene experiencia previa con videojuegos? Si la respuesta es sí,

indique por favor con qué frecuencia juega:

.....

A.2.4 Solicitud al comité ético



Viceconsejería de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

Fecha de entrada:

Nº de registro:

CUESTIONARIO PARA EVALUACIÓN POR EL COMITÉ ÉTICO DE EXPERIMENTACIÓN. PROYECTOS DE INVESTIGACION EN HUMANOS CON RECOGIDA DE DATOS/CUESTIONARIOS SIN MUESTRAS BIOLÓGICAS

Datos del Responsable del estudio:

Nombre y Apellidos: Luis Molina Tanco		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Profesor Contratado Doctor		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:

Datos de los investigadores que participant en el estudio:

Nombre y Apellidos: Daniel González Toledo		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Investigador con cargo a proyecto		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos: Maria Cuevas Rodríguez		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Investigadora con cargo a proyecto		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos: Arcadio Reyes Lecuona		DNI:
Dpto.: Tecnología Electrónica	Centro/Facultad: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación	
Puesto/Cargo: Titular de Universidad		
Dirección: Bulevar Louis Pasteur, 35		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos:		DNI:
Dpto.:	Centro/Facultad:	
Puesto/Cargo:		
Dirección:		
Teléfono:	Fax:	e-mail:
Nombre y Apellidos:		DNI:
Dpto.:	Centro/Facultad:	
Puesto/Cargo:		
Dirección:		
Teléfono:	Fax:	e-mail:





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

Título del estudio:

Estudio comparativo de técnicas de rotación de objetos 3D basadas en elipsoides con eje fijo

Breve descripción de los objetivos del proyecto (adjuntando, como documentación complementaria el resumen, los objetivos y el plan de trabajo):

*Importante indicar n aproximado del estudio, forma en la que se reclutarán a los participantes en el mismo, metodología a usar, bibliografía sobre la misma (máximo 350 palabras).

El objetivo principal es el estudio de diferentes técnicas de interacción en un entorno 3D virtual a través del uso de un pantalla de ordenador y un ratón.

En particular, se pretende evaluar dos técnicas de interacción innovadoras, alternativas a la que implementan la mayoría de las herramientas actuales. Estas dos técnicas se basan en un estudio anterior publicado por el equipo investigador [1], en el que pudimos demostrar que, al fijar un eje de referencia de forma coherente con el eje intrínseco del objeto con el que se está interaccionando, se aumenta el rendimiento y la usabilidad percibida, y disminuye la fatiga.

En este nuevo estudio se pretende comprobar si, frente a la navegación esférica clásica, las técnicas basadas en elipsoides llevan a una interacción más natural. El estudio medirá si existe beneficio tanto en rendimiento como la experiencia del usuario.

Se reclutarán voluntarios de la E.T.S.I. de Telecomunicación. El estudio tendrá lugar en el laboratorio del grupo DIANA (TIC-171), situado en el mismo centro. Se anunciará en los foros de Campus Virtual de los grados de la ETSIT la posibilidad de participar y se acordará con los participantes un día y una hora.

Para evitar situaciones de autoridad, los investigadores que realizan el reclutamiento y tratan con los participantes durante el experimento son los estudiantes de doctorado involucrados en este estudio.

El experimento en sí durará unos 40 minutos. Se le pedirá a cada sujeto que utilice una aplicación en un ordenador normal, y que interactúe con ella con el ratón. Los datos que se recogerán serán el tiempo de respuesta, de forma automática durante el uso de la aplicación, y posteriormente, la usabilidad y carga de trabajo percibidas, a través de cuestionarios de usabilidad (SUS) y de carga de trabajo (NASA TLX).

[1] Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L. et al. Still room for improvement in traditional 3D interaction: selecting the fixed axis in the virtual trackball. *Vis Comput* (2022).
<https://doi.org/10.1007/s00371-021-02394-x>



Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
E-mail- vnrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es

-2-





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

Cuestionario

1.- ¿Se garantiza que la participación en el estudio es de forma voluntaria y libre, que los participantes pueden retirarse del estudio en el momento que deseen sin que suponga ningún perjuicio para ellos y que los sujetos disponen de información suficiente para otorgar su consentimiento a participar en la misma? Por favor adjuntar documento de consentimiento informado.

SI NO

2.- En caso de menores de 14 años será necesario también contar con el asentimiento de los niños y el consentimiento de los padres. ¿Se contempla esta circunstancia?

SI NO

* En caso de realizar el estudio con menores será un requisito imprescindible para poder dar un informe favorable aportar para cada participante que vaya a tener contacto directo con los menores el/los certificado/s negativo/s del Registro Central de Delincentes Sexuales (Ley Orgánica 1/1996, de Protección Jurídica del Menor, modificada por la Ley 26/2015 y la Ley 45/2015)

3.- ¿Se ofrecen incentivos o compensaciones a los sujetos por su participación en los experimentos?

SI * NO

* Si la respuesta es afirmativa explique su naturaleza y cuantía

4.- El estudio se va a realizar en otros centros distintos de la Universidad de Málaga.

SI NO

En caso afirmativo cuenta con la autorización de dichos centros

SI * NO

* por favor adjuntar dicha autorización



EFQM
Committed to excellence



AGENCIA NACIONAL DE EVALUACIÓN
DE LA CALIDAD Y Acreditación

Pabellón de Gobierno, 3ª Planta, Campus El Ejido, 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
E-mail- vrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es

-3-





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

5.- ¿Su estudio/proyecto ha sido informado favorablemente por otro Comité de Ética?

SI * NO

* por favor adjuntar dicho informe

6.- La investigación conlleva la recogida de datos personales de seres humanos a través de cuestionarios, entrevista a grupos de discusión, grabaciones de audio o video, fotografías...)

SI * NO

* Si la respuesta es afirmativa indicar qué información será recogida, cómo se recogerá esta información, quien se encargará de dicha recogida

7.- Por favor indicar cómo se garantiza suficientemente el respeto a la intimidad de los sujetos experimentales?

Se considera que en este estudio no se pone en ningún momento en riesgo el respeto a la intimidad de los sujetos experimentales.
No se solicitan datos de carácter personal, y, en cualquier caso, todas las respuestas se almacenan anonimizadas, como se explica más adelante.



EFQM
Committed to excellence



Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
E-mail- vnrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es

-4-





Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

8.- ¿Participan en el estudio personas especialmente vulnerables, como menores de edad, incapacitados, personas con trastornos mentales, etc.?

SI * NO

* En el caso de la respuesta afirmativa por favor e indicar como se preservará la ley de protección de datos para estas circunstancias

9.- Como se garantiza el cumplimiento de la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales.

La investigación permite identificar a los participantes (o permite que puedan ser identificables a partir de datos recogidos).

SI NO

Indicar forma de recogida de datos, en caso de anonimización cómo se realizará, como será la custodia de ficheros...

Los cuestionarios demográficos son anonimizados usándose un identificador de participante que en ningún momento se puede asociar a la identidad del participante. Las respuestas recogidas durante el experimento son también identificadas con este identificador, que no puede ser asociado a la identidad del participante. Los consentimientos informados, que sí contienen el nombre del participante, se guardarán bajo llave y no contienen ninguna forma de vincular la identidad del participante

10.- Resuma cómo se garantiza el cumplimiento de todos los requisitos éticos y legales previstos para el estudio (recogido en los puntos anteriores).

- El estudio no supone ningún riesgo, ni físico, ni psicológico, para los participantes, como puede comprobarse en la descripción del mismo.
- El riesgo de contagio por COVID se ha minimizado con una batería de medidas que cumplen los requisitos establecidos por las autoridades sanitarias y las recomendaciones específicas para este tipo de estudios usadas por la comunidad científica.
- En todo momento se garantiza el respeto a la intimidad de los participantes y se evita cualquier situación de autoridad, informándose explícitamente a los participantes de que pueden abandonar la prueba sin ningún tipo de consecuencia en cualquier momento, de lo cual se informa en el consentimiento informado que se adjunta.



Pabellón de Gobierno 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
E-mail- vrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité de Ética (CEUMA)

COMPROMISO ESCRITO DEL INVESTIGADOR RESPONSABLE DEL PROYECTO

Título del Proyecto:	Estudio comparativo de técnicas de rotación de objetos 3D basadas en elipsoides con eje fijo
Investigador Responsable:	Luis Molina Tanco
Departamento:	Tecnología Electrónica

LISTA DE DECLARACIONES

El investigador abajo firmante declara conocer y atenerse a lo dispuesto en la normativa legal vigente.

Igualmente, asume que el informe del comité de ética de la Universidad de Málaga se referirá únicamente al procedimiento recogido en este impreso, por lo que cualquier modificación, sin solicitar una nueva aprobación por parte del CEUMA, será responsabilidad exclusiva del solicitante.

Fdo:

Málaga, a

DOCUMENTACION ADICIONAL A ADJUNTAR

Autorización de centros distintos de la Universidad de Málaga

Informe favorable por otro Comité de Ética



EFQM
Committed to excellence



Pabellón de Gobierno. 3ª Planta, Campus El Ejido. 29071 Tel.: 952 13 10 47 Fax: 952 13 10 47
E-mail- vnrinvestigacion@uma.es
ceuma@uma.es

-6-



A.2.5 Aprobación del comité ético



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Vicerrectorado de Investigación y Transferencia
Comité Ético de Experimentación de la Universidad de Málaga
(CEUMA)

Nº: 9

Nº de Registro CEUMA: 23-2022-H

INFORME DEL COMITÉ ÉTICO DE EXPERIMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

CEUMA

Reunido el Comité Ético de Experimentación en Málaga, el 28 de febrero de 2022 ha evaluado la solicitud del proyecto denominado: "**Estudio comparativo de técnicas de rotación de objetos 3D basadas en elipsoides con eje fijo**" cuyo investigador principal es **D. Luis Molina Tanco**.

Una vez examinada la documentación presentada y verificados aquellos aspectos relacionados con la ética y la legislación en materia de investigación que se indican:

- Se cumplen los requisitos necesarios de idoneidad del protocolo en relación con los objetivos del estudio y están justificados los riesgos y molestias previsibles para el sujeto, teniendo en cuenta los beneficios esperados.

- El procedimiento para obtener el consentimiento informado, incluyendo la hoja de información al sujeto son correctos.

- La idoneidad del procedimiento experimental, especialmente la posibilidad de alcanzar conclusiones válidas de acuerdo con los objetivos establecidos.

- La capacidad del investigador principal y sus colaboradores los medios y las instalaciones previstas son apropiados para llevar a cabo dicho estudio.

- El alcance de las compensaciones y motivaciones previstas no interfiere con el respeto a los postulados éticos.

Acuerda por consenso emitir Informe Ético **FAVORABLE** para dicho proyecto.

Una vez instruido el procedimiento, y en base a lo dispuesto en el artículo 82 de la Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas, se le da audiencia para que en un plazo de 10 días, contados a partir de la recepción/publicación del presente informe, pueda formular alegaciones y presentar los documentos y justificaciones que estime pertinentes.

Para que así conste D. TEODOMIRO LÓPEZ NAVARRETE, Vicerrector de Investigación y Transferencia y Presidente del Comité Ético de Investigación de la Universidad de Málaga lo firma en Málaga a 6 de abril de 2022.

Fdo: Teodomiro López Navarrete.



Pabellón de Gobierno, planta 3ª. Campus El Ejido. 29071. Tel.: 952 13 42 04
E-mail- ceuma@uma.es





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Bibliografía

- Agrawala, M., Phan, D., Heiser, J., Haymaker, J., Klingner, J., Hanrahan, P., & Tversky, B. (2003). Designing effective step-by-step assembly instructions. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 22(3), 828-837. <https://doi.org/10.1145/882262.882352>
- Andújar, C., Vázquez, P., & Fairén, M. (2004). Way-Finder: guided tours through complex walkthrough models. *Computer Graphics Forum*, 23(3), 499-508. <https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2004.00781.X>
- Argelaguet, F., & Andujar, C. (2013). A survey of 3D object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*, 37(3), 121-136. <https://doi.org/10.1016/J.CAG.2012.12.003>
- Argelaguet, F., & Andujary, C. (2009). Visual feedback techniques for virtual pointing on stereoscopic displays. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, 163-170. <https://doi.org/10.1145/1643928.1643966>
- Autodesk. (2012). *3ds Max - 3d Modelling, Animation and Rendering Software*. <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview>
- Avery, B., Sandor, C., & Thomas, B. H. (2009). *Improving Spatial Perception for Augmented Reality X-Ray Vision*. 79-82. <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4811002>
- Bade, R., Ritter, F., & Preim, B. (2005a). Usability comparison of mouse-based interaction techniques for predictable 3d rotation.

- En *Smart Graphics* (Vol. 3638, pp. 138-150). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/11536482>
- Bade, R., Ritter, F., & Preim, B. (2005b). Usability comparison of mouse-based interaction techniques for predictable 3d rotation. En *Smart Graphics* (Vol. 3638, pp. 138-150). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/11536482>
- Bane, R., & Höllerer, T. (2004). Interactive tools for virtual X-ray vision in mobile augmented reality. *ISMAR 2004: Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 231-239. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2004.36>
- Bares, W. H., & Lester, J. C. (1998). Intelligent Multi-Shot Visualization Interfaces for Dynamic 3D Worlds. *Proceedings of the 4th international conference on Intelligent user interfaces*, 119-126.
- Bernstein, N. A. (1967). *The Coordination and Regulation of Movement*. Pergamon Press.
- Berthouze, L., & Lungarella, M. (2004). Motor Skill Acquisition Under Environmental Perturbations: On the Necessity of Alternate Freezing and Freeing of Degrees of Freedom. *Adaptive Behavior*, 12(1), 47-64.
- Besançon, L., Issartel, P., Ammi, M., & Isenberg, T. (2017a). Mouse, Tactile, and Tangible Input for 3D Manipulation. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, 4727-4740. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025863>
- Besançon, L., Issartel, P., Ammi, M., & Isenberg, T. (2017b). Mouse, Tactile, and Tangible Input for 3D Manipulation. *Proceedings of*

- the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, 4727-4740.
<https://doi.org/10.1145/3025453.3025863>
- Besançon, L., Ynnerman, A., Keefe, D. F., Yu, L., & Isenberg, T. (2021). The State of the Art of Spatial Interfaces for 3D Visualization. *Computer Graphics Forum*, 40(1), 293-326.
<https://doi.org/10.1111/CGF.14189>
- Bichlmeier, C., Wimmer, F., Heining, S. M., & Navab, N. (2007). Contextual anatomic mimesis: Hybrid in-situ visualization method for improving multi-sensory depth perception in medical augmented reality. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR*.
<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538837>
- Blender Foundation. (2015). *blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software*. Blender.Org.
<https://www.blender.org/>
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2015). Unified Modeling Language User Guide , The (2nd Edition) (Addison-Wesley Object Technology Series) Unified Modeling Language User Guide , The Unified Modeling Language User Guide , The Many of the designations used by manufacturers and sellers to dist. *ResearchGate*, 2nd(August), 392.
- Borsci, S., Federici, S., & Lauriola, M. (2009). On the dimensionality of the System Usability Scale: A test of alternative measurement models. *Cognitive Processing*, 10(3), 193-197.
<https://doi.org/10.1007/s10339-009-0268-9>

- Brooke, J. (1996a). SUS: A «quick and dirty» usability scale. En P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Eds.), *Usability Evaluation in Industry*. Taylor and Francis.
- Brooke, J. (1996b). SUS: A «quick and dirty» usability scale. En P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Eds.), *Usability Evaluation in Industry*. Taylor and Francis.
- Buda, V. (2012). *Rotation techniques for 3D object interaction on mobile devices* (Número August) [Utrecht University]. <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/255390>
- Burns, M. (2011). Efficient and Comprehensible Visualization of Complex 3-D Scenes. *PhD Thesis, Princeton University*. http://gfx.cs.princeton.edu/pubs/_2011_EAC/bibtex.php
- Burns, M., & Finkelstein, A. (2008). Adaptive cutaways for comprehensible rendering of polygonal scenes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(5). <https://doi.org/10.1145/1409060.1409107>
- Chen, M., Mountford, S. J., Sellen, A., Chen, M., Mountford, S. J., & Sellen, A. (1988a). A study in interactive 3-D rotation using 2-D control devices. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 22(4), 121-129. <https://doi.org/10.1145/378456.378497>
- Chen, M., Mountford, S. J., Sellen, A., Chen, M., Mountford, S. J., & Sellen, A. (1988b). A study in interactive 3-D rotation using 2-D control devices. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 22(4), 121-129. <https://doi.org/10.1145/378456.378497>
- Chen, S., Miranda, F., Ferreira, N., Lage, M., Doraiswamy, H., Brenner, C., Defanti, C., Koutsoubis, M., Wilson, L., Perlin, K., & Silva, C. (2022). UrbanRama: Navigating Cities in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer*

- Graphics*, 28(12), 4685-4699.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2021.3099012>
- Cockburn, A., Karlson, A., & Bederson, B. B. (2009). A review of overview+detail, zooming, and focus+context interfaces. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41(1), 31.
<https://doi.org/10.1145/1456650.1456652>
- Cumming, G. (2014). The New Statistics: Why and How. *Psychological science*, 25(1), 7-29.
<https://doi.org/10.1177/0956797613504966>
- Daniel Hoffpauir. (2019, septiembre 2). *Model-Based Systems Engineering: Informed Decisions for Adoption & Alignment - NASA*. NESC Technical Update. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/nesc/model-based-systems-engineering-informed-decisions-for-adoption-alignment/>
- de Arquer, I., & Nogareda, C. (2001). Estimación de la carga mental de trabajo: el método NASA TLX. *Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Gobierno de España, NTP 544*.
- Debiasi, A., Simões, B., & De Amicis, R. (2015). 3DArcLens: Interactive Network Analysis on Geographic Surfaces. *6th International Conference on Information Visualization Theory and Applications (IVAPP-2015)*, 291-299.
<https://doi.org/10.5220/0005255202910299>
- Decle, F. (2009). ScrutiCam: Camera manipulation technique for 3D objects inspection. *IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2009*, 3-6.
- Decle, F., & Hachet, M. (2009). A study of direct versus planned 3d camera manipulation on touch-based mobile phones.

- MobileHCI09 - The 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*.
<https://doi.org/10.1145/1613858.1613899>
- Devin, F. (s. f.). *Sistema de Escalas de Usabilidad: ¿qué es y para qué sirve? | UXpañol*. 2017. Recuperado 3 de febrero de 2020, de <http://uxpanol.com/teoria/sistema-de-escalas-de-usabilidad-que-es-y-para-que-sirve/>
- Diepenbrock, S., Ropinski, T., & Hinrichs, K. (2011). Context-aware volume navigation. *2011 IEEE Pacific Visualization Symposium*, 11-18. <https://doi.org/10.1109/PACIFICVIS.2011.5742367>
- Elmqvist, N., Assarsson, U., & Tsigas, P. (2007). Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: Design issues and evaluation. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4662 LNCS(PART 1), 532-545. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74796-3_54/COVER
- Elmqvist, N., & Tsigas, P. (2007). View-projection animation for 3D occlusion management. *Computers & Graphics*, 31(6), 864-876. <https://doi.org/10.1016/J.CAG.2007.09.006>
- Elmqvist, N., & Tsigas, P. (2008). A taxonomy of 3D occlusion management for visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(5), 1095-1109. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.59>
- Elmqvist, N., & Tudoreanu, M. E. (2007). Occlusion Management in Immersive and Desktop 3D Virtual Environments: Theory and Evaluation. *INTERNATIONAL JOURNAL OF VIRTUAL REALITY*, 6(1).

- ESA. (2023, agosto 23). *ESA - Model-based system engineering*.
https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Model-based_system_engineering
- European Commission. (2016, noviembre 30). *Innovative continuous upgrades of high investment product-services / USE-IT-WISELY / Project / Fact sheet / FP7 / CORDIS / European Commission*.
CORDIS EU Research results.
<https://cordis.europa.eu/project/id/609027>
- Evans, K. B., Tanner, P. P., & Wein, M. (1981). Tablet-based valuers that provide one, two, or three degrees of freedom. *Proceedings of the 8th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1981*, 15, 91-97.
<https://doi.org/10.1145/800224.806794>
- Fitzmaurice, G., Matejka, J., Mordatch, I., Khan, A., & Kurtenbach, G. (2008). Safe 3D navigation. *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, I3D 2008*, 7-15.
<https://doi.org/10.1145/1342250.1342252>
- Forlines, C., Wigdor, D., Shen, C., & Balakrishnan, R. (2007). Direct-touch vs. mouse input for tabletop displays. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 647-656.
<https://doi.org/10.1145/1240624.1240726>
- Friedenthal, S., Moore, A., & Steiner, R. (2014). *A practical guide to SysML: the systems modeling language*. Morgan Kaufmann.
<https://www.academia.edu/download/73088918/c158c95430a561305e3e050e9ee74011e55b.pdf>
- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., & Flores-Holgado, S. (2017). Collaborative Management of Inspection Results in

- Power Plant Turbines. En S. N. Grösser, A. Reyes-Lecuona, & G. Granholm (Eds.), *Dynamics of Long-Life Assets: From Technology Adaptation to Upgrading the Business Model* (pp. 193-208). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45438-2_11
- González-toledo, D., Cuevas-rodríguez, M., Garre, C., Molina-tanco, L., & Reyes-lecuona, A. (2015). A Tool for Collaborative Decision Making on Service Information Linked to 3D Geometry of Complex Hierarchical Products. *EuroVR2015*, 1-6.
- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodríguez, M., Garre-Del-Olmo, C., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2017). HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 14(3). <https://doi.org/10.20385/1860-2037/14.2017.3>
- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Garre-Del-Olmo, C., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2018). HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 14(3). <https://doi.org/10.20385/1860-2037/14.2017.3>
- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2018). 3D Object Rotation Using Virtual Trackball with Fixed Reference Axis. *Proceeding of EuroVR2018*, 1, 3-5. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2593170>
- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2022a). Still room for improvement in traditional 3D interaction: selecting the fixed axis in the virtual trackball. *Visual Computer*, 39(3), 1149-1162. <https://doi.org/10.1007/S00371-021-02394-X/FIGURES/10>

- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2022b). Still room for improvement in traditional 3D interaction: selecting the fixed axis in the virtual trackball. *Visual Computer*. <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02394-x>
- Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Molina-Tanco, L., & Reyes-Lecuona, A. (2024). The Spheroidal Trackball: generalizing the Fixed Trackball for virtual camera navigation. *Visual Computer*.
- González-Toledo Daniel, C.-R. M. G. C. M.-T. L. R.-L. A. (2016, noviembre). HOM3R: A 3D Viewer for Complex Hierarchical Product Models. *Proceedings of EuroVR2016*. <https://www.euroxr-association.org/conference2016/program/ts3.html>
- Google SketchUp. (2019). *3D Design Software 3D Modeling on the Web SketchUp*. <https://www.sketchup.com/>
- Grösser, S. N., Reyes-Lecuona, A., & Granholm, G. (2017). Dynamics of long-life assets: From technology adaptation to upgrading the business model. En *Dynamics of Long-Life Assets: From Technology Adaptation to Upgrading the Business Model*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45438-2>
- Hachet, M., Declé, F., Knödel, S., & Guitton, P. (2009). Navidget for 3D interaction: Camera positioning and further uses. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(3), 225-236. <https://doi.org/10.1016/J.IJHCS.2008.09.013>
- Hand, C. (1997). A survey of 3D interaction techniques. *Computer Graphics Forum*, 16(5), 269-281. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00194>

- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904-908. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Henriksen, K., Sporring, J., & Hornbaek, K. (2004a). Virtual trackballs revisited. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(2), 206-216. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2004.1260772>
- Henriksen, K., Sporring, J., & Hornbaek, K. (2004b). Virtual trackballs revisited. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(2), 206-216. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2004.1260772>
- Hommel, B. (2015). The theory of event coding (TEC) as embodied-cognition framework. *Frontiers in Psychology*, 6, 1318. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01318>
- ISO/TC 159/SC, T. C. (2000). *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs). Part 9: Requirements for non-keyboard input devices* (Número ISO 9241-9). ISO, Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/30030.html>
- Ivson, P., Moreira, A., Queiroz, F., Santos, W., & Celes, W. (2020). A Systematic Review of Visualization in Building Information Modeling. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(10), 3109-3127. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2019.2907583>
- Jacob, I., & Oliver, J. (1995). Evaluation of techniques for specifying 3D rotations with a 2D input device. En M. A. R. Kirby, Alan. Dix, & J. E. Finlay (Eds.), *Proceedings of the HCI'95 conference*

- on People and computers X* (p. 438). Cambridge University Press.
- Kalkofen, D., Tatzgern, M., & Schmalstieg, D. (2009). Explosion diagrams in augmented reality. *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, 71-78. <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4811001>
- Khan, A., Komalo, B., Stam, J., Fitzmaurice, G., & Kurtenbach, G. (2005). HoverCam: interactive 3D navigation for proximal object inspection. *Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games*, 1(212), 73-80. <https://doi.org/10.1145/1053427.1053439>
- Kratz, S., & Rohs, M. (2010). Extending the virtual trackball metaphor to rear touch input. *3DUI 2010 - IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2010, Proceedings*, 111-114. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2010.5444712>
- Kunde, W., Müsseler, J., & Heuer, H. (2007). Spatial Compatibility Effects With Tool Use. *Human Factors*, 49(4), 661-670. <https://doi.org/10.1518/001872007X215737>
- LaViola, J., Kruijff, E., Bowman, D., McMahan, R., & Poupyrev, I. (2017). *3D User Interfaces: Theory and Practice* (2.^a ed.). Addison-Wesley Professional. <https://www.pearson.com/us/higher-education/program/La-Viola-3-D-User-Interfaces-Theory-and-Practice-2nd-Edition/PGM101825.html>
- Lewis, J. R., & Sauro, J. (2009). The Factor Structure of the System Usability Scale. *International conference on human centered design*, 94-103. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02806-9_12
- Li, W., Agrawala, M., Curless, B., & Salesin, D. (2008). Automated generation of interactive 3D exploded view diagrams. *ACM*

- Transactions on Graphics*, 27(3), 1.
<https://doi.org/10.1145/1360612.1360700>
- Li, W., Ritter, L., Agrawala, M., Curless, B., & Salesin, D. (2007). Interactive cutaway illustrations of complex 3D models. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), 31.
<https://doi.org/10.1145/1276377.1276416>
- Lujin Wang, Ye Zhao, Mueller, K., & Kaufman, A. (2005). The Magic Volume Lens: An Interactive Focus+Context Technique for Volume Rendering. *VIS 05. IEEE Visualization, 2005*, 367-374.
<https://doi.org/10.1109/VISUAL.2005.1532818>
- Malomo, L., Cignoni, P., & Scopigno, R. (2016). Generalized trackball for surfing over surfaces. *Proceedings of the Conference on Smart Tools and Applications in Computer Graphics*, 89-97.
<https://doi.org/10.2312/stag.20161368>
- Marton, F., Rodriguez, M. B., Bettio, F., Agus, M., Villanueva, A. J., & Gobbetti, E. (2014). IsoCam: Interactive Visual Exploration of Massive Cultural Heritage Models on Large Projection Setups. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 7(2), 1-24.
<https://doi.org/10.1145/2611519>
- Maslych, M., Hmaiti, Y., Ghamandi, R., Leber, P., Kattoju, R. K., Belga, J., & Laviola, J. J. (2023). Toward Intuitive Acquisition of Occluded VR Objects Through an Interactive Disocclusion Mini-map. *Proceedings - 2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2023*, 460-470.
<https://doi.org/10.1109/VR55154.2023.00061>
- Massaro, D. W., & Norman, D. A. (1990). The psychology of everyday things. *American Journal of Psychology*, 103(1), 141.
<https://doi.org/10.2307/1423268>

- McCrae, J., Mordatch, I., Glueck, M., & Khan, A. (2009). Multiscale 3D navigation. *Proceedings of I3D 2009: The 2009 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 7-14. <https://doi.org/10.1145/1507149.1507151>
- Mühler, K., Neugebauer, M., Tietjen, C., & Preim, B. (2007). Eurographics/ IEEE-VGTC Symposium on Visualization (2007) Viewpoint Selection for Intervention Planning. *Eurographics/ IEEE-VGTC Symposium on Visualization*, 267-274.
- Müsseler, J., & Skottke, E.-M. (2011). Compatibility Relationships With Simple Lever Tools. *Human Factors*, 53(4), 383-390. <https://doi.org/10.1177/0018720811408599>
- Nataliya Shevchenko. (2020, diciembre 21). *An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE)*. Software Engineering Institute. Carnegie Mellon University. <https://insights.sei.cmu.edu/blog/introduction-model-based-systems-engineering-mbse/>
- Neuville, R., Pouliot, J., Poux, F., & Billen, R. (2019). 3D Viewpoint Management and Navigation in Urban Planning: Application to the Exploratory Phase. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 236, 11(3)*, 236. <https://doi.org/10.3390/RS11030236>
- Norman, D. (1983). Some Observations on Mental Models. En D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental Models* (pp. 7-14). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Official Google, B. (2016). *3D Warehouse*. <https://3dwarehouse.sketchup.com/>
- Pasquinelli, M., Molina-Tanco, L., Reyes-Lecuona, A., & Cencetti, M. (2017). Extending the system model. En *Dynamics of Long-Life*

- Assets: From Technology Adaptation to Upgrading the Business Model*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45438-2_10
- Pindat, C., Pietriga, E., Chapuis, O., & Puech, C. (2013). Drilling into complex 3D models with gimlenses. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, 223-230. <https://doi.org/10.1145/2503713.2503714>
- Poupyrev, I., & Ichikawa, T. (1999). Manipulating Objects in Virtual Worlds: Categorization and Empirical Evaluation of Interaction Techniques. *Journal of Visual Languages & Computing*, 10(1), 19-35. <https://doi.org/10.1006/JVLC.1998.0112>
- Proctor, R. W., & Van Zandt, T. (2008). *Human Factors in Simple and Complex Systems, Second Edition* (2nd Editio). CRC Press. <https://learning.oreilly.com/library/view/human-factors-in/9780805841190/chapter-01.html>
- Rey, J. (2013). *Modeling with VSEE: Definition of Guidelines and Exploitation of the Models YGT Final Report*. <https://www.vsd-project.org/download/documents/YGT%20final%20report%20Rey%20V2.pdf>
- Reyes-Lecuona, A., Gonzalez-Toledo, D., Cuevas-Rodriguez, M., Herruzo-torrico, M. L., García-puyol, A., & Molina-tanco, L. (2019). PLUGGY3D. Augmented Reality for cultural heritage. *Proceedings of the 16th Annual EuroVR Conference - 2019*, 103-106.
- Ritter, F., Preim, B., Deussen, O., & Strothotte, T. (2000). *Using a 3d puzzle as a metaphor for learning spatial relations*.
- Rocha, A., Silva, J. D., Alim, U. R., Carpendale, S., & Sousa, M. C. (2019). Decal-Lenses: Interactive Lenses on Surfaces for Multivariate Visualization. *IEEE Transactions on Visualization*

- and Computer Graphics*, 25(8), 2568-2582.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2850781>
- Ropinski, T., & Hinrichs, K. (2004). Real-Time Rendering of 3D Magic Lenses having arbitrary convex Shapes. *Journal of the International Winter School of Computer Graphics (WSCG04)*, 379-386.
<https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/1725/1/D03.pdf>
- Rybicki, S., DeRenzi, B., & Gain, J. (2016). Usability and performance of mouse-based rotation controllers. *Proceedings - Graphics Interface*, 93-100.
- Sadana, R., & Stasko, J. (2014). Designing and implementing an interactive scatterplot visualization for a tablet computer. *Proceedings of the Workshop on Advanced Visual Interfaces A VI*, 265-272. <https://doi.org/10.1145/2598153.2598163>
- Santiago Martínez de la Casa. (2023, octubre). ¿BIM para la industria? *Revista Automática e Instrumentación*, número 550, 18-19. <https://www.automaticeinstrumentacion.com/texto-diario/mostrar/2862624/bim-industria>
- Sauro, J. (2011). *MeasuringU: Measuring Usability with the System Usability Scale (SUS)*. <https://measuringu.com/sus/>
- Sauro, J., & Lewis, J. R. (2010). Average task times in usability tests. *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10*, 2347. <https://doi.org/10.1145/1753326.1753679>
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260. <https://doi.org/10.1037/h0076770>

- Schwenderling, L., Kleinau, A., Herbrich, W., Kasireddy, H., Heinrich, F., & Hansen, C. (2023). Activation modes for gesture-based interaction with a magic lens in AR anatomy visualisation. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 11(4), 1243-1250. <https://doi.org/10.1080/21681163.2022.2157749>
- Shaw, C. D. (1998). Pain and Fatigue in Desktop VR: Initial Results. *Proc. Graphics Interface*, 185-192. <https://doi.org/10.20380/GI1998.23>
- Shoemake, K. (1992). ARCBALL: a user interface for specifying three-dimensional orientation using a mouse. *Proceedings of the conference on Graphics interface '92*, 151-156.
- Shoemake, K. (1994). Arcball rotation control. En P. S. Heckbert (Ed.), *Graphics gems IV* (pp. 175-192). AP Professional.
- Sigg, S., Fuchs, R., Carnecky, R., & Peikert, R. (2012). Intelligent cutaway illustrations. *IEEE Pacific Visualization Symposium 2012, PacificVis 2012 - Proceedings*, 185-192. <https://doi.org/10.1109/PACIFICVIS.2012.6183590>
- Sketchfab. (2019). *Sketchfab - Publish & find 3D models online*. <https://sketchfab.com/>
- Sonnet, H., Carpendale, S., & Strothotte, T. (2004). Integrating expanding annotations with a 3D explosion probe. *Proceedings of the Workshop on Advanced Visual Interfaces AVI*, 63-70. <https://doi.org/10.1145/989863.989871>
- Spheroid* - *Wikipedia*. (s. f.). Recuperado 14 de agosto de 2022, de <https://en.wikipedia.org/wiki/Spheroid>

- Sykora, S. (2005). *Approximations of Ellipse Perimeters and of the Complete Elliptic Integral $E(x)$. Review of known formulae.* <https://doi.org/10.3247/SL1Math05.004>
- Systèmes, D. (2013). *3D CAD Design Software SolidWorks.* <http://www.solidworks.com/>
- Thornton, R. W. (1979a). The Number Wheel. *Proceedings of the 6th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '79, 13, 102-107.* <https://doi.org/10.1145/800249.807430>
- Thornton, R. W. (1979b). The Number Wheel. *Proceedings of the 6th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '79, 13, 102-107.* <https://doi.org/10.1145/800249.807430>
- Tominski, C., Gladisch, S., Kister, U., Dachsel, R., & Schumann, H. (2017). Interactive Lenses for Visualization: An Extended Survey. *Computer Graphics Forum, 36(6), 173-200.* <https://doi.org/10.1111/CGF.12871>
- Vanacken, L., Grossman, T., & Coninx, K. (2007). Exploring the effects of environment density and target visibility on object selection in 3D virtual environments. *IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2007 - Proceedings, 3DUI 2007, 115-122.* <https://doi.org/10.1109/3DUI.2007.340783>
- VandenBos, G. R. (2009a). Publication Manual of the American Psychological Association (6th ed.). *American Psychological Association.*
- VandenBos, G. R. (2009b). Publication Manual of the American Psychological Association (6th ed.). *American Psychological Association.* <http://www.apastyle.org/manual/>

- Weisstein, E. W. (s. f.). *Gauss-Kummer Series*. Wolfram Research, Inc. Recuperado 14 de agosto de 2022, de <https://mathworld.wolfram.com/>
- Weisstein, E. W. (2020). *Evolute - from Wolfram MathWorld*. From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/Evolute.html>
- World Geodetic System - Wikipedia*. (s. f.). Recuperado 14 de agosto de 2022, de https://en.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System
- Ying, S., Chen, N., Li, W., Li, C., & Guo, R. (2019). Distortion visualization techniques for 3D coherent sets: A case study of 3D building property units. *Computers, Environment and Urban Systems*, 78, 101382. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2019.101382>
- Yu, L., Svetachov, P., Isenberg, P., Everts, M. H., & Isenberg, T. (2010). FI3D: Direct-touch interaction for the exploration of 3D scientific visualization spaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(6), 1613-1622. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.157>
- Zhang, F., Katsuragawa, K., & Lank, E. (2022). Conductor: Intersection-Based Bimanual Pointing in Augmented and Virtual Reality. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 6(ISS), 560. <https://doi.org/10.1145/3567713>