

MEMORIA DE INVESTIGACIÓN

Análisis de dispositivos de captura de movimiento aplicados a tratamientos de rehabilitación y programas de entrenamiento deportivo

Carlos Quesada Granja

MEMORIA DE INVESTIGACIÓN

Análisis de dispositivos de captura de movimiento aplicados a tratamientos de rehabilitación y programas de entrenamiento deportivo

Carlos Quesada Granja

Programa de Doctorado:

Tecnologías de la Sociedad de la Información

Tutor:

Dr. Antonio Soriano Payá

19 de julio de 2010



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA
INFORMÁTICA Y COMPUTACIÓN

Al verano de 2009.

Índice general

I	Periodo de Docencia	1
1.	Asignaturas	3
1.1.	Aplicaciones de Inteligencia Artificial: Redes Neuronales	3
1.2.	Computación Paralela	4
1.3.	Matemática Numérica	5
1.4.	Métodos de Optimización y Multiagente	5
1.5.	Redes Multimedia	6
1.6.	Seguridad Avanzada en Redes de Comunicación	6
1.7.	Sistemas Distribuidos Avanzados	7
II	Periodo de Investigación	9
2.	Introducción	11
2.1.	Justificación	11
2.2.	Motivación	12
2.3.	Objetivos	14
2.4.	Descripción del problema	15
3.	Estado del arte	17
3.1.	Introducción	17
3.2.	Clasificación	19
3.3.	Tecnologías	20
3.3.1.	Sistemas ópticos	21
3.3.2.	Sistemas magnéticos	28
3.3.3.	Sistemas mecánicos	31
3.3.4.	Sistemas inerciales	32

3.3.5. Sistemas acústicos	34
3.4. Dispositivos comerciales	36
3.4.1. Dispositivos ópticos	36
3.4.2. Dispositivos magnéticos	40
3.4.3. Dispositivos mecánicos	43
3.4.4. Dispositivos inerciales	44
3.4.5. Dispositivos acústicos	47
3.5. Conclusiones	47
4. El <i>Wii Remote</i> y el <i>Wii MotionPlus</i> de Nintendo	51
4.1. Introducción	51
4.2. Descripción hardware	51
4.2.1. Comunicación <i>Bluetooth</i>	51
4.2.2. Informe de estado	55
4.2.3. Presentación de datos	58
4.2.4. Memoria y registros	61
4.2.5. Características de entrada	65
4.2.6. Características de salida	73
4.2.7. La extensión <i>Wii MotionPlus</i>	76
4.3. Programación	77
4.4. Conclusiones	79
5. Experimentación	81
5.1. Introducción	81
5.2. Análisis del comportamiento de los acelerómetros del <i>Wii Remote</i>	81
5.2.1. Detección de la orientación	82
5.2.2. Detección de la posición	84
5.3. Análisis del comportamiento de los giroscopios del <i>Wii MotionPlus</i>	90
5.3.1. Detección de la orientación	90
5.4. Programa desarrollado	94
6. Conclusiones	97
6.1. Aportaciones	97
6.2. Líneas futuras	97
A. Glosario	99
Referencias	103

Índice de figuras

2.1. Proyecto PRESENCIA, Instituto de Neurociencias–CSIC.	13
3.1. Componentes de un sistema de adquisición de movimiento.	18
3.3. Sistemas ópticos.	23
3.4. Disposición de cámaras en un sistema óptico con marcadores.	24
3.5. Sistema con marcadores con configuración de dentro hacia fuera.	26
3.6. Sistema de captura mediante haces de exploración.	28
3.7. Sistema mecánico flexible de fibra óptica.	32
3.8. Componentes internos básicos de un dispositivo inercial.	33
3.9. Sistemas ópticos de <i>OptiTrack</i>	37
3.10. Sistemas ópticos de <i>Vicon</i> y <i>Worldviz</i>	38
3.11. Sistemas ópticos de <i>Ascension</i> y <i>3rdTech</i>	39
3.12. Sistemas magnéticos de <i>Polhemus</i>	41
3.13. Sistemas magnéticos de <i>Ascension</i>	42
3.14. Sistemas mecánicos de <i>Animazoo</i> y <i>Measurand</i>	43
3.15. Sistemas inerciales de <i>Xsens</i> e <i>InterSense</i>	45
3.16. Sistemas inerciales de <i>Nintendo</i> y <i>Sony</i>	47
4.1. Componentes del <i>Wii Remote</i>	52
4.2. Circuito impreso del <i>Wii Remote</i>	53
4.3. Circuito integrado de la memoria EEPROM del <i>Wii Remote</i>	63
4.4. Acelerómetro del <i>Wii Remote</i>	67
4.5. Cámara del <i>Wii Remote</i>	69
4.6. La extensión <i>Wii MotionPlus</i> acoplada en un <i>Wii Remote</i>	76
4.7. Formato de datos del <i>Wii MotionPlus</i>	77
4.8. Captura de pantalla de un programa de pruebas de la librería <i>WiimoteLib</i>	78

5.1. Valores proporcionados por los tres ejes del acelerómetro.	85
5.2. Valores proporcionados por los tres ejes del acelerómetro tras la supresión de la componente continua.	87
5.3. Velocidad calculada a partir de los valores de los acelerómetros.	87
5.4. Posición calculada a partir de los valores de los acelerómetros.	88
5.5. Aceleración, velocidad y posición del eje X del acelerómetro acotadas entre los 4 y los 10 segundos.	89
5.6. Valores de los acelerómetros con media móvil de diez muestras.	90
5.7. Valores de la posición con media móvil de diez muestras.	91
5.8. Medida de la velocidad angular en el eje vertical tras dos giros completos.	91
5.9. Medida de la posición angular en el eje vertical tras dos giros completos.	92
5.10. Señales del giroscopio tras la realización de la segunda prueba.	93
5.11. Señales de la posición calculadas tras la realización de la segunda prueba.	94
5.12. Capturas de pantalla del programa desarrollado.	95

Índice de tablas

3.1. Tabla comparativa de tecnologías.	49
4.1. Información proporcionada por el <i>Wii Remote</i> tras una consulta del protocolo de descubrimiento de servicios de <i>Bluetooth</i>	53
4.2. Informes del <i>Wii Remote</i>	54
4.3. Significado de los bits LF en el informe de estado del <i>Wii Remote</i>	56
4.4. Rangos de memoria conocidos del <i>Wii Remote</i>	64
4.5. Lista de periféricos conocidos del <i>Wii Remote</i>	65
4.6. Distribución de los bits entre los botones básicos del <i>Wii Remote</i>	66
4.7. Hardware de los botones del <i>Wii Remote</i>	67
4.8. Bits de los valores de la aceleración en los informes de datos normales.	68
4.9. Bits de los valores de la aceleración en los informes de datos intercalados.	68
4.10. Configuraciones de sensibilidad de la cámara del <i>Wii Remote</i>	70
4.11. Modo y su número de la cámara de IR.	71
4.12. Formato de datos del modo básico de la cámara de IR.	72
4.13. Formato de datos del modo extendido de la cámara de IR.	72
4.14. Formato de datos del modo completo de la cámara de IR.	72
4.15. Bits de control de los diodos LED.	73
5.1. Medidas del acelerómetro para diferentes orientaciones del <i>Wii Remote</i>	82

Parte I

Periodo de Docencia

Capítulo 1

Asignaturas

Con el fin de obtener una correcta formación en el ámbito del conocimiento científico y técnico, que me permitiera afrontar la realización de un trabajo original de investigación, inicié mis estudios de doctorado cursando el periodo de docencia dentro del programa de doctorado *Tecnologías Industriales y de Telecomunicación* de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Se trata de un programa multidisciplinar, organizado por cuatro departamentos (el *Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica*, el *Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales*, el *Departamento de Física y Arquitectura de Computadores* y el *Departamento de Estadística e Investigación Operativa*), que centran su actividad en los ámbitos de la Ingeniería Industrial y la Ingeniería de Telecomunicación.

Durante este curso, tuve la oportunidad de familiarizarme con distintas materias y campos de investigación que después me han sido de utilidad para realizar este trabajo de investigación. A continuación, presento una breve reseña de las siete asignaturas cursadas (de tres créditos cada una), lo que éstas han supuesto para mí y los trabajos realizados durante dicho periodo.

1.1. Aplicaciones de Inteligencia Artificial: Redes Neuronales

Esta asignatura cubre aspectos básicos relacionados con la Inteligencia Artificial, además de ofrecer un marco de referencia para los sistemas con algún grado de inteligencia. Dentro de los múltiples campos abordados en Inteligencia Artificial se hace especial hincapié en las redes neuronales debido a su fuerte presencia en la resolución

de problemas de difícil sistematización.

El estudio de esta asignatura me permitió conocer los desarrollos matemáticos básicos para el planteamiento de diversos esquemas de redes neuronales presentes en la actualidad, en función del tipo de problema que se pretenda resolver, prestando atención a los problemas prácticos resueltos mediante redes neuronales en diversos campos industriales. Asimismo, conocí los problemas inherentes a la integración de información que proviene de diversas fuentes (como pueden ser diferentes sensores), prestando especial atención al estudio del filtro de Kalman.

Para profundizar en los conceptos adquiridos y buscar una utilidad orientada a futuras investigaciones, desarrollé el trabajo *Reconocimiento de patrones con redes neuronales*. En este trabajo, centrado en la disciplina científica que tiene como objetivo la clasificación de señales en varias categorías o clases, analicé las aplicaciones, los sistemas y los enfoques más comunes en el reconocimiento de patrones y estudié con detalle el funcionamiento de algunos sistemas, como el perceptrón multicapa, las redes neuronales de orden superior, las redes convolucionales y el neocognitrón.

En el contexto de este trabajo de investigación, esta asignatura me ha sido de utilidad para conocer algunas herramientas que pueden ser útiles para corregir el ruido y otras imprecisiones de las señales generadas por los dispositivos de captura de movimiento.

1.2. Computación Paralela

Debido a la demanda de ordenadores con gran capacidad de cálculo, la solución a la limitación de trabajar con un único procesador debe buscarse en el procesamiento paralelo. Es decir, la replicación de unidades de procesamiento para repartir las tareas entre todas ellas, tanto espacial como temporalmente y reducir así el tiempo de cómputo. Esta asignatura prepara para el desarrollo de soluciones computacionales orientadas a plataformas de altas prestaciones (supercomputadores, *clusters* de ordenadores, etc.), ante problemas de cálculo de grandes dimensiones.

El estudio de esta asignatura me permitió conocer las bases del procesamiento paralelo, sus principales herramientas y su aplicación a distintos algoritmos susceptibles de ser paralelizados. Para asentar los conocimientos adquiridos en esta asignatura, llevé a cabo un análisis comparativo de los rendimientos en la velocidad de cálculo de los dos principales enfoques en la programación multiproceso: el interfaz de paso de mensajes (MPI) y la memoria compartida (OpenMP).

Esta asignatura me permitió integrarme en el grupo de investigación GATCOM (Grupo de Arquitectura y Tecnología de COMputadores) de la UMH, en el marco

del proyecto SIMIL (SIMulación dIstribuida muLtinodo). Este proyecto tenía como objetivo la reducción a una cuarta parte del tiempo de simulación necesario para la validación de sistemas electrónicos digitales de elevada complejidad. Dentro del grupo tuve la oportunidad de co-participar en la *10th International Work-Conference on Artificial Neural Networks* (IWANN 2009), con la publicación *A Case Study in Distributing a SystemC Model*.

En el contexto de este trabajo de investigación, esta asignatura me ha servido para conocer la existencia de alternativas de procesamiento más eficientes en el caso de que se deba computar un gran volumen de datos.

1.3. Matemática Numérica

Esta asignatura proporciona conocimientos teóricos y prácticos sobre métodos numéricos aplicados a la resolución de problemas de interpolación (polinomios de Lagrange y de Newton), de derivación e integración numérica (reglas del trapecio y de Simpson, integración de Romberg y de Gauss–Legendre), y de ecuaciones diferenciales ordinarias (métodos de Euler, Heun y Runge–Kutta) y en derivadas parciales (ecuaciones elípticas, parabólicas e hiperbólicas).

Los conocimientos teóricos conseguidos durante el transcurso en esta asignatura me permitieron desarrollar un conjunto de aplicaciones, programadas con el entorno de cálculo numérico *Matlab* para resolver varios problemas relacionados con el temario de la asignatura.

En el contexto de este trabajo de investigación, esta asignatura me ha ayudado a comprender la base matemática de los algoritmos que he utilizado en la fase experimental y su implementación informática.

1.4. Métodos de Optimización y Multiagente

En esta asignatura se estudian los principales métodos de optimización para la asignación de recursos escasos, haciendo especial énfasis en su aplicación al diseño y evaluación de costes en sistemas de ingeniería. Por otra parte, también se estudian modelos no cooperativos y cooperativos procedentes de la Teoría de Juegos, que tienen especial relevancia en su aplicación en sistemas de comunicaciones, en particular en las comunicaciones inalámbricas.

Durante el transcurso de esta materia, pude asistir a dos seminarios: *El core y los conjuntos estables de von Neumann–Morgenstern en los mercados de asignación*, que

presentaba nuevos enfoques orientados a la Teoría de Juegos; y *En busca de la situación ideal*, que daba algunas recomendaciones generales sobre cómo elegir la ubicación de entidades en diferentes situaciones.

1.5. Redes Multimedia

En esta asignatura se definen las aplicaciones multimedia y los requisitos que éstas demandan de la arquitectura de red para un transporte eficiente. A continuación, se hace una introducción general a las técnicas de compresión de datos para, posteriormente, abordar la codificación de medios continuos (en particular audio, imagen y vídeo), ya que es una de las partes más críticas de las aplicaciones multimedia. Seguidamente, se estudian los protocolos de transporte específicos que habitualmente se utilizan en Internet para este tipo de datos. Posteriormente, se discuten una serie de técnicas relacionadas con el transporte de vídeo, como el control de congestión, la protección y ocultación de errores, la transcodificación, etc. Finalmente, se muestran las tecnologías de red más utilizadas (Internet y las redes inalámbricas), así como aquellas tecnologías de red que ofrecen algún tipo de soporte para el transporte de datos multimedia.

Para ahondar en la materia, desarrollé el trabajo *Digital Video Broadcasting*, en el que describí de forma detallada el conjunto de estándares abiertos de DVB para televisión digital y servicios de datos. A continuación, realicé una exposición en clase sobre las características más relevantes de estos estándares. Por otro lado, asistí a los seminarios *Algoritmos eficientes para el cálculo de la transformada wavelet* y *15 años de redes Manet: estado del arte y sus aplicaciones*, ambos relacionados con el temario de la asignatura e impartidos por ponentes de la Universidad Politécnica de Valencia.

Esta materia me ha proporcionado una visión global sobre los sistemas de transporte de datos multimedia, desde las tecnologías de red (especialmente Internet y las redes inalámbricas) hasta las aplicaciones multimedia (codificación de imagen y vídeo), pasando por las distintas estrategias para el transporte eficiente de los datos (técnicas de *streaming*, mecanismos para la protección y ocultación de errores, calidad de servicio, etc.).

1.6. Seguridad Avanzada en Redes de Comunicación

Esta asignatura proporciona conocimientos teóricos y aplicados del cifrado moderno, y en particular de los estándares de seguridad en las comunicaciones. Los contenidos de la asignatura abarcan los principales ataques a ordenadores y redes (dene-

gación de servicio, *spoofing*, *spam*, *sniffers*, gusanos, virus), las vulnerabilidades en los principales protocolos de red (IP, TCP, UDP, ARP y RARP, ICMP, STP), los mecanismos de prevención de ataques mediante cifrado (RSA, DES y Triple DES, IDEA, AES), la autenticación, las firmas digitales, las autoridades certificadoras y la seguridad en las comunicaciones inalámbricas.

Para profundizar en la materia realicé tres exposiciones en clase sobre contenidos del temario: el estándar de cifrado AES, el protocolo para el intercambio de claves de Diffie–Hellman y el protocolo de cifrado TLS/SSL.

1.7. Sistemas Distribuidos Avanzados

El contenido de esta asignatura proporciona conocimientos sobre todos los aspectos de la computación distribuida, esto es, metodologías, técnicas y protocolos sobre el diseño e implementación de sistemas complejos formados por elementos de computación y comunicación repartidos a lo largo de una red. En particular, se tratan los sistemas distribuidos con restricciones de tiempo real, como los que se encuentran en los sistemas multimedia, la electrónica de la aviación, la robótica, las bases de datos distribuidas, los sistemas de alta disponibilidad, etc.

En el marco de esta asignatura, se realizó una visita a la torre de control del Aeropuerto de Alicante para recibir una charla sobre el funcionamiento distribuido del Sistema SACTA (Sistema Automatizado de Control de Tráfico Aéreo), que es el encargado de controlar el tráfico aéreo en ruta.

Por otro lado, para profundizar en la materia, también desarrollé un trabajo llamado *IPTV: Network and Transport Layers* en el que recopilé información sobre las capas de red y transporte del modelo de comunicaciones del *Internet protocol television* (IPTV).

Parte II

Periodo de Investigación

Capítulo 2

Introducción

2.1. Justificación

La investigación en el campo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) es una de las principales prioridades para los países de la Unión Europea [1,2], ya que es fundamental para la creación de empleo y la mejora de la calidad de vida de sus ciudadanos.

Uno de los aspectos en los que se incide en el último Programa Marco para la Investigación y el Desarrollo Tecnológico [1] es en la aplicación de las TIC a la medicina, que da lugar a la e-Salud (o *e-Health* en inglés). La e-Salud, que hace referencia a todas aquellas prácticas que se apoyan en procesos electrónicos y de telecomunicación, permiten mejoras en muchos campos del sistema sanitario: desde los administrativos, hasta los relacionados con la toma de imágenes biomédicas, los cuidados personalizados basados en el hogar, la medicina y la rehabilitación en el hogar, la creación de nuevos medicamentos, etc. La investigación en este campo, por lo tanto, permite mejorar la calidad, la disponibilidad y la efectividad de la salud y la asistencia sanitaria.

Dos especialidades médicas que se pueden beneficiar de las TIC son la rehabilitación y la medicina del deporte. Tanto el personal sanitario dedicado a la rehabilitación como los equipos médicos deportivos tienen como objetivo la mejora de las habilidades funcionales de sus pacientes o deportistas. Esto se consigue mediante un tratamiento de rehabilitación o un programa de entrenamiento deportivo intensivo y prolongado en el tiempo. Sin embargo, la sostenibilidad de estos programas y su universalización en régimen de hospitalización o de atención ambulatoria suponen un serio problema de administración de recursos. Es por ello que se hace necesaria la realización de los ejercicios de rehabilitación y de entrenamiento deportivo por el propio paciente o deportista

de forma supervisada a distancia.

La prestación de servicios de rehabilitación y entrenamiento deportivo por medio de sistemas electrónicos basados en las TIC ha convertido a la telemedicina en una realidad que permite extender la atención médica más allá del ámbito hospitalario. Las mejoras en la comunicación permiten compartir e intercambiar información entre los profesionales de salud, los pacientes, su entorno y los investigadores. Además, facilitan la adherencia terapéutica y el cumplimiento del tratamiento al proporcionar información inmediata a los pacientes. Estos servicios favorecen el acceso a la asistencia especializada a pacientes que viven en zonas remotas, lo que les permite un seguimiento continuado, la detección de alteraciones o incidencias durante el transcurso del tratamiento, la monitorización de situaciones de riesgo y una reducción de los costes por desplazamiento entre el domicilio y el centro de salud [3].

Sin embargo, la prestación de este tipo de servicios es un problema complejo que no está del todo resuelto en la actualidad. Todavía no se ha desarrollado una metodología científico-técnica que facilite un rápido avance en el conocimiento de las tecnologías existentes, la optimización de su uso, su implantación y, finalmente, la evaluación del impacto real de estos nuevos servicios.

2.2. Motivación

Antes de embarcarse en un proyecto de tanta envergadura como lo es un doctorado, al que se le deben dedicar tantas horas de trabajo e implicación, conviene exponer las razones que le llevan a uno a llevarlo a cabo. En esta sección hago una pequeña reflexión sobre los principales motivos por los que decidí elegir este camino en mi formación y, de forma más concreta, el porqué de su relación con la Ingeniería Biomédica en general y con los sistemas de rehabilitación y la actividad física deportiva en particular.

Durante mi formación como Ingeniero de Telecomunicación en la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), pude realizar unas prácticas formativas y trabajar como apoyo a la investigación en el Instituto de Neurociencias (IN), un centro mixto de la UMH y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) orientado a la investigación neurocientífica.

El trabajo que realicé en el IN durante prácticamente todo un año (2005) se enmarcó dentro del proyecto de investigación europeo denominado PRESENCIA (FP6 IST FET 27731) [4], que tenía como objetivo el desarrollo de aplicaciones completas en entornos de realidad virtual (incluyendo gráficos por ordenador, física en tiempo real, tecnología háptica, programación en red, etc.) para el estudio de la percepción humana. Las labores que desempeñé allí incluyeron el diseño de escenarios en realidad

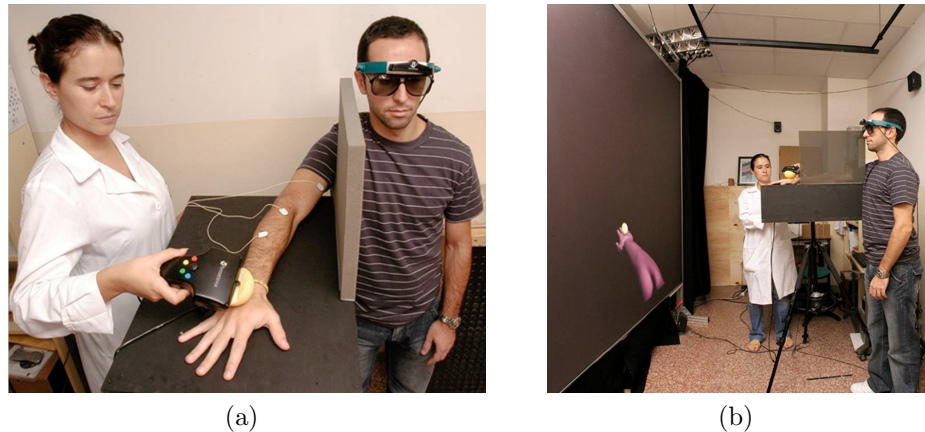


Figura 2.1: Proyecto PRESENCIA, Instituto de Neurociencias–CSIC. Fase de experimentación de la denominada «ilusión del brazo virtual» [5] realizada en el entorno de realidad virtual en el que trabajé.

virtual para el estudio de procesos de integración multisensorial (figura 2.1), el análisis de estructuras biológicas mediante el uso de reconstrucción tridimensional, y el diseño y programación de un protocolo para el estudio del comportamiento de animales de laboratorio usando software matemático y una tarjeta de adquisición de datos.

Esta experiencia fue muy valiosa para mí por tres motivos. Primero, porque me dio la oportunidad de ponerme a prueba como ingeniero; es decir, pude llevar a la práctica satisfactoriamente, en mi primer entorno laboral, los conocimientos adquiridos durante la carrera. Segundo, porque vi el funcionamiento de un centro de investigación y el trabajo diario desarrollado por la comunidad científica. Esto me permitió conocer una alternativa al mundo de la empresa como salida laboral y me hizo sentir un gran interés por iniciar mi propio recorrido investigador y continuar con los estudios de doctorado una vez terminada la carrera. Por último, me gustó mucho la idea de que el aporte de mis conocimientos en ingeniería al campo de la medicina y otras ciencias de la vida pudiera ser útil para el desarrollo o el descubrimiento de métodos más eficientes que ayuden a personas con problemas de salud y sus cuidadores o aquellos especialistas que tratan o investigan su cura. Desde mi punto de vista, considero que, de todas las posibles salidas que puede tener una ingeniería, ésta es la que más merece la pena desde el punto de vista humano.

Cuando terminé los estudios, inicié el periodo docente del doctorado en la UMH, dentro del programa *Tecnologías Industriales y de Telecomunicación*, y centré la investigación en el área de la computación paralela. Sin embargo, a pesar de que el campo de aplicación de esta disciplina es muy importante para la resolución de grandes problemas de cálculo en menos tiempo, no vi tan satisfechas mis preferencias como cuando mis esfuerzos se enfocaban hacia la Ingeniería Biomédica. Por esta razón, decidí cambiar y continuar el periodo investigador del doctorado en la Universidad de Alicante

(UA). Su programa de doctorado *Tecnologías de la Sociedad de la Información* me pareció mucho más atrayente, ya que las áreas de trabajo del grupo *Ingeniería Bioinspirada e Informática para la Salud* (IBIS) se orientan directamente hacia mis intereses de investigación.

La motivación objetiva de este trabajo se fundamenta en que los tratamientos de rehabilitación y los programas de entrenamiento físico deportivo presentan diversas limitaciones y restricciones, tanto en su desarrollo como en su control. Una de las limitaciones más importantes que existen en el diseño de nuevos sistemas para este campo es la adecuación de los ejercicios propuestos por los especialistas a las plataformas electrónicas e informáticas existentes y a las necesidades específicas de cada paciente [3]. Otro requerimiento que todavía no se ha satisfecho plenamente es la gestión eficaz de la información derivada de la ejecución de estas actividades por parte de los pacientes y los deportistas que permita a los especialistas médicos llevar a cabo un seguimiento del tratamiento pautado y prescribir nuevos tratamientos más individualizados. Por otro lado, una dificultad común a las que se enfrenta este tipo de sistemas es asegurar la interoperatividad con tecnologías y sistemas de información existentes en el domicilio y el centro que proporciona el servicio. Esto dificulta a los pacientes y deportistas la instalación y uso de los sistemas de rehabilitación en los ordenadores personales de sus domicilios, así como el mantenimiento y la continuidad del servicio.

Es necesario que el diseño de este tipo de plataformas contemple un repertorio de tareas, ya sea para la rehabilitación funcional o para la medicina del deporte, lo bastante amplio como para desarrollar programas integrales y personalizados. Asumir este compromiso permitirá desarrollar sistemas con mayor aceptación, un mayor número de usuarios potenciales, mayor viabilidad económica de desarrollo y un precio final más asequible.

Los servicios avanzados de rehabilitación y entrenamiento deportivo que se plantean aquí son un campo reciente de investigación básica y aplicación clínica. Se han llevado a cabo estudios enfocados a describir algunos sistemas experimentales de este tipo [6] y a evaluar su efectividad [7]. En un análisis global de estos estudios realizado por [7] se concluye que el enfoque propuesto es prometedor y que los datos obtenidos muestran una tendencia positiva en la aplicación de esta metodología.

2.3. Objetivos

Se propone como objetivo general de este proyecto el diseño y desarrollo de un sistema de adquisición de movimiento en el espacio capaz de proporcionar una alta usabilidad, tanto en tratamientos de rehabilitación como en programas de entrena-

miento deportivo, a un bajo coste.

El sistema estará formado por un dispositivo de adquisición de movimiento y una aplicación informática básica que permita mostrar el movimiento realizado por dicho dispositivo. Para alcanzar este propósito, se plantean de forma más concreta los siguientes objetivos específicos:

1. Elaboración de un estado del arte sobre los dispositivos de captura de movimiento. Se deben describir las tecnologías empleadas en su funcionamiento y los dispositivos comerciales actuales con el fin de seleccionar el más apropiado, esto es, aquél que cumpla con los criterios generales de usabilidad y coste.
2. Descripción detallada del dispositivo seleccionado que permita conocer cómo se gestiona su hardware (memoria, entradas y salidas de datos, etc.) para poder controlarlo.
3. Análisis de librerías de programación que permitan administrar y controlar el dispositivo seleccionado. Uso y optimización de una de ellas.
4. Desarrollo de una aplicación básica que interprete, gestione y almacene los datos proporcionados por el dispositivo mediante el uso de la librería de programación anteriormente especificada.

2.4. Descripción del problema

Actualmente, uno de los principales desafíos de los tratamientos de rehabilitación y de los programas de entrenamiento deportivo es el desarrollo de sistemas que permitan la ejecución de las tareas pautadas por los terapeutas de manera segura y controlada [3, 8]. Es decir, que el paciente o el deportista pueda realizar los ejercicios con la postura, movimiento, frecuencia y número de repeticiones adecuados. Cuando estos ejercicios se tienen que realizar sin que un especialista esté presente para ayudar en su correcto desarrollo, es frecuente que los ejercicios no se lleven a cabo correctamente, o que directamente no se realicen. En cualquiera de los dos casos, la consecuencia directa es un aumento de los recursos necesarios que se deben invertir para cumplir el tratamiento con éxito (mayor tiempo empleado, mayor coste económico, incremento de las listas de espera de los servicios de fisioterapia, etc.), además de la posible aparición de secuelas físicas adquiridas por una incorrecta realización de los ejercicios.

En este proceso, el especialista debe medir el grado de movilidad del paciente o deportista para comprobar que éste realiza correctamente los ejercicios. Estas mediciones

permiten conocer la evolución de la lesión o el progreso del tratamiento y le proporcionan realimentación al paciente. Para ello, se debe disponer de un sistema de adquisición de movimiento en el equipo que registre las coordenadas espaciales de movimiento y las orientaciones en el espacio a lo largo del tiempo.

El funcionamiento de un sistema para rehabilitación y medicina deportiva que utilice el dispositivo de adquisición de movimiento será el siguiente. En primer lugar, el especialista realizará el ejercicio ante el paciente o deportista para que éste vea cómo se lleva a cabo y para que el movimiento quede almacenado en el sistema. A continuación, un programa implementado en el sistema le solicitará al paciente que indique una serie de parámetros (como las posiciones inicial y final del movimiento que puede realizar). Con estos valores, la aplicación ya estará disponible para que el paciente realice las repeticiones del ejercicio indicado por el especialista. Una vez terminado el ejercicio, el software guardará en un servidor los datos correspondientes a la sesión (fecha, ejercicio realizado, parámetros relacionados con su ejecución, etc.) que el especialista podrá consultar posteriormente. El programa, además, hará uso del archivo histórico de datos para calcular el grado de mejora que el paciente o deportista ha obtenido a lo largo del tiempo y que le servirá como *biofeedback*.

Para ayudar al usuario, el sistema se complementa con una aplicación que dispondrá de instrucciones en pantalla que mostrarán, valiéndose de texto y gráficos, instrucciones y datos relevantes sobre el ejercicio que se debe realizar, como por ejemplo, cómo se debe iniciar y realizar, el número de repeticiones, la mejora obtenida hasta el momento, etc.

Teniendo en cuenta el contexto indicado anteriormente, en este proyecto de investigación se planteará y se desarrollará un sistema de adquisición de movimiento en el espacio que permita registrar los movimientos del usuario. Dicho sistema servirá de base para su utilización en el marco de los tratamientos de rehabilitación y programas de entrenamiento deportivo.

Capítulo 3

Estado del arte

3.1. Introducción

Los sistemas de adquisición de movimiento son sistemas en tiempo real que permiten obtener las posiciones y las orientaciones cambiantes de objetos individuales (como por ejemplo, partes del cuerpo humano) a medida que éstos se mueven por el espacio durante un determinado periodo de tiempo [9]. En general, estos sistemas están formados por los elementos que se enumeran a continuación, aunque algunos de ellos se pueden omitir dependiendo de la tecnología utilizada [10].

1. Un sujeto de captura.
2. Sensores y/o fuentes que se colocan sobre el cuerpo.
3. Sensores y/o fuentes externas.
4. Una interfaz entre el ordenador y los componentes electrónicos.
5. Un ordenador.
6. Los datos que representan el movimiento humano.

El movimiento de un objeto siempre es relativo a un punto de referencia. Para medir este movimiento (véase la figura 3.1), un sensor situado en el sujeto de captura puede detectar la posición, la orientación o la distancia relativa a una fuente situada en un punto de referencia. Asimismo, un sensor situado en la referencia puede detectar una fuente que esté situada en el sujeto de captura. El cuerpo humano está formado por muchas partes móviles, de modo que, si se toman unas partes como referencia de

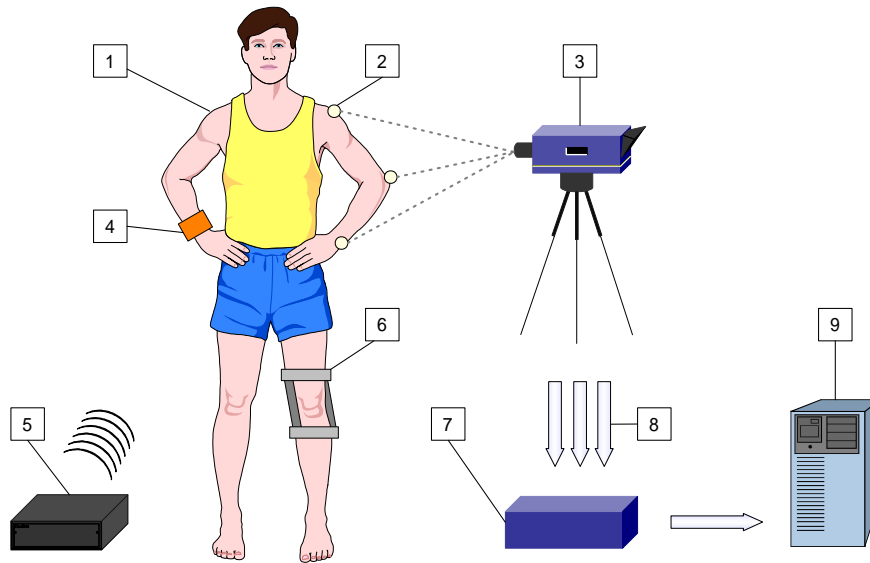


Figura 3.1: Componentes de un sistema de adquisición de movimiento. (1) Sujeto de captura. (2) Fuentes sobre el cuerpo (p. ej. marcadores reflectantes). (3) Sensores externos (p. ej. cámaras). (4) Sensores sobre el cuerpo (p. ej. bobinas o micrófonos de ultrasonidos). (5) Fuentes externas (p. ej. generadores de campo o ultrasonidos). (6) Fuentes y sensores sobre el cuerpo (p. ej. exoesqueletos). (7) Interfaz ordenador–componentes electrónicos. (8) Entradas de los sensores. (9) Ordenador.

otras, tanto la fuente como el sensor se pueden situar en el cuerpo. La fuentes pueden ser naturales (como el campo gravitacional terrestre) o artificiales (la luz emitida por un LED). Una interfaz entre el ordenador y los componentes electrónicos recibe las señales obtenidas por los sistemas de captura y las adapta para que un ordenador las pueda procesar. Como resultado de este procesamiento se obtienen los datos finales de movimiento [10].

El sistema coordinado tridimensional suele ser el sistema de referencia que permite describir los datos de la posición y la orientación proporcionados por los sistemas de captura de movimiento. Existen seis grados de libertad (o DOF, del inglés *degrees of freedom*) asociados a un sistema coordinado tridimensional. Los grados de libertad hacen referencia a la capacidad de un sistema de captura de medir la posición y la orientación de un objeto en el espacio. Se dice que un sistema tiene 6 grados de libertad (6DOF) cuando proporciona los tres valores que definen la posición tridimensional (x, y, z) y los tres ángulos de rotación que definen la orientación (con respecto a los ejes transversal, longitudinal y vertical) de un sujeto de captura. Un sistema con 3 grados de libertad (3DOF) sólo proporciona directamente la posición o la orientación, pero no las dos características a la vez.

3.2. Clasificación

Existen varias formas de clasificar o describir los sistemas de adquisición de movimiento en función de las características que se analicen. Una de las dos clasificaciones o taxonomías más comunes se basa en el lugar donde se encuentran las fuentes y los sensores de captura [10–12] (la otra clasificación se centra en la tecnología de los sistemas, como se verá más adelante). De esta forma, los sistemas de captura se pueden dividir en sistemas *de fuera hacia dentro*, *de dentro hacia fuera* o *de dentro hacia dentro* (o según la nomenclatura original en inglés de [10], sistemas *outside-in*, *inside-out* e *inside-in*). La primera parte de cada una de las tres expresiones hace referencia al lugar en el que se encuentran situados los sensores con respecto al sujeto de captura. Así, en un sistema en el que los sensores están colocados *sobre* el propio sujeto de captura (fig. 3.1, puntos 4 y 6), la primera parte de la expresión recibe el nombre de «*de dentro*», mientras que un sistema en el que los sensores no tienen contacto directo con el sujeto de captura (fig. 3.1, punto 3) recibe el nombre de «*de fuera*». La segunda parte de las expresiones describe el lugar en el que se encuentra la fuente del sistema. Si la fuente es (o está situada en) el propio sujeto de captura (fig. 3.1, puntos 2 y 6), esta parte de la expresión recibe el nombre de «*hacia dentro*»; y «*hacia fuera*» en caso contrario (fig. 3.1, punto 5) [12].

Un *sistema de fuera hacia dentro* usa sensores externos para reunir datos de las fuentes colocados en el cuerpo. Ejemplos de estos sistemas son los dispositivos de seguimiento basados en cámaras, en los que las cámaras son los sensores y los marcadores reflectantes son las fuentes. Una de las ventajas de estos sistemas es que las fuentes suelen ser de tamaño reducido y, por lo tanto, son los menos molestos para el sujeto de captura. Pueden realizar seguimiento de muchos marcadores a la vez, con una resolución o exactitud de media a alta y con la capacidad de expandir la cobertura del volumen de captura añadiendo sensores (cámaras) adicionales. En cambio, un inconveniente importante es el problema de las interrupciones de la visión directa entre los marcadores y las cámaras. Otras desventajas son que requieren una configuración minuciosa, que utilizan complicados algoritmos de procesamiento y que el equipo necesario suele ser caro.

Los *sistemas de dentro hacia fuera* tienen sensores colocados en el cuerpo que obtienen datos de fuentes externas. Los sistemas magnéticos, cuyos sensores se mueven dentro de campo magnético generado externamente, son ejemplos de este tipo de sistemas. Sus ventajas son que tienen un tamaño pequeño o mediano con respecto al sujeto de captura, que pueden proporcionar información tridimensional y en algunos casos con 6DOF, que tienen altas tasas de muestreo y que se prestan a un funciona-

miento inalambrico que permite libertad de movimientos. Los inconvenientes podrían incluir volúmenes de captura pequeños o medianos debido a la limitada potencia de las fuentes, y unas resoluciones y exactitudes de bajas a medias.

Los *sistemas de dentro hacia dentro* sitúan las fuentes y los sensores en el cuerpo. Ejemplos de estos dispositivos son los sistemas mecánicos, cuyos sensores son potenciómetros o goniómetros y las fuentes son las articulaciones reales del cuerpo. Tiene como ventajas que permiten un gran volumen de captura, que carecen de interferencias del entorno y que pueden proporcionar una gran resolución. Como inconvenientes, son físicamente restrictivos, su configuración requiere mucho tiempo, suelen necesitar la conexión de muchos cables y, por lo general, no proporcionan datos sobre la posición debido a la falta de una referencia tridimensional.

Para algunos sistemas, la clasificación en uno de estos tres grupos puede resultar compleja [12]. No obstante, la clasificación más común para describir los sistemas de adquisición de movimiento es la que se basa en el tipo de tecnología usada. A esta clasificación se le dedica toda la sección 3.3, donde se estudian las características de cada sistema, analizando sus ventajas e inconvenientes y las aplicaciones en las que se emplean. Otras clasificaciones menos comunes se basan en la parte del cuerpo sobre la que se tiene que realizar el seguimiento [10] o en el número de grados de libertad de los sistemas [12].

3.3. Tecnologías

Son numerosos los autores [12–20] que coinciden al clasificar los dispositivos de adquisición de movimiento en función de la tecnología empleada en cinco grandes grupos: sistemas ópticos, mecánicos, magnéticos, inerciales y acústicos. Algunos autores clasifican los sistemas de la misma forma pero obvian en su análisis una o dos de las tecnologías anteriores [11, 21–24] (aunque los sistemas ópticos, mecánicos y magnéticos siempre aparecen). Otros autores añaden tecnologías que no se encuentran entre las cinco principales citadas, como los sistemas de radiofrecuencia [12, 16, 17] o los sistemas híbridos [13, 18], que se consideran una combinación de dos o más de las tecnologías anteriores.

Cada una de las tecnologías de los sistemas de adquisición de movimiento tiene su propio conjunto de características basadas en la tecnología del sensor. Por lo general, estas características determinan cómo se diseña un sistema de captura y cómo de bien se realiza el seguimiento.

3.3.1. Sistemas ópticos

Los sistemas de adquisición de movimiento ópticos se diseñan usando diversas técnicas. Mientras que muchos de ellos se pueden clasificar como sistemas con marcadores, existen otros sistemas que no pertenecen a esta categoría.

Un sistema con marcadores, según la clasificación propuesta por [13], es aquél que utiliza un conjunto de marcadores ópticos. Estos marcadores pueden ser activos (emisores de luz) o pasivos (reflectores de luz). Para su detección se usan sensores tales como cámaras o fotodiodos. Dependiendo de la posición en la que se encuentren los marcadores y los sensores, estos sistemas se pueden dividir, a su vez, en dos categorías: sistemas con configuración *de dentro hacia fuera*, en la que los marcadores se colocan en lugares fijos del entorno y los sensores en el sujeto de captura; y sistemas con configuración *de fuera hacia dentro*, en la que los marcadores se sitúan en el sujeto de captura y los sensores en lugares fijos del entorno. Los sistemas *de dentro hacia fuera* sólo aparecen en algunas de las referencias consultadas [12, 13], pero es importante explicar su funcionamiento porque existen dispositivos comerciales que emplean esta tecnología. Por otro lado, los sistemas *de fuera hacia dentro*, que están bien documentados, son los que se denominan como propiamente ópticos en las referencias más actuales [11, 16–19, 22–25].

El resto de sistemas se clasifica en [13] como «otros seguidores ópticos». En este grupo se encuentran los sistemas que no utilizan marcadores ópticos. Entre ellos se encuentran los basados en vídeo [18–20, 23, 24], en los que el propio sujeto de captura es la fuente del sistema, y los haces de exploración [26]. Algunas referencias también incluyen en esta categoría sistemas que están considerados como escáneres tridimensionales y no como dispositivos de captura de movimiento, como son los sistemas de luz estructurada, los radares láser o la interferometría láser [13–15]. Estos sistemas no se estudian en esta sección, ya que estos escáneres no permiten detectar cambios en la posición ni la orientación de un sujeto de captura en función del tiempo.

En la figura 3.2 se muestra un esquema que sintetiza la clasificación de los sistemas ópticos que se acaba de plantear.

Sistemas con marcadores (configuración de fuera hacia dentro)

En un sistema óptico con marcadores típico [11, 19, 23, 27], se colocan pequeños marcadores sobre el sujeto de captura. Varias cámaras, calibradas para proporcionar diferentes proyecciones que se solapan entre sí, se sitúan alrededor del volumen de captura y toman instantáneas de la escena cada breves periodos de tiempo. Las imágenes obtenidas se introducen en un software que calcula las coordenadas tridimensionales de cada uno de los marcadores a partir de las dimensiones conocidas del volumen de

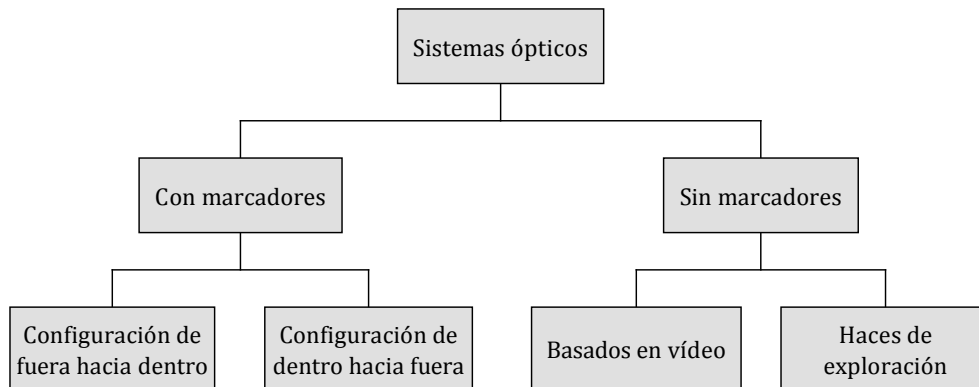


Figura 3.2: Esquema de clasificación de los sistemas ópticos.

captura. El número de marcadores y sus características, así como su posición relativa en el sujeto de captura variarán en gran medida dependiendo del tipo de datos de movimiento que se desea adquirir y del propósito para el que se usarán estos datos [27]. Es por esta razón, que los sistemas ópticos típicos se suelen clasificar en dos grandes grupos atendiendo a si sus marcadores son reflectantes (pasivos) o emisores de luz (activos). Kitagawa y Windsor [19], además, también mencionan las recientes tecnologías para la adquisición de movimiento, que realizan un seguimiento dinámico y continuo de la superficie del sujeto de captura sin necesidad de usar marcadores. En esta sección se analizan las características de cada uno de estos grupos de sistemas ópticos.

En los sistemas ópticos con marcadores pasivos (figura 3.3a), los marcadores están realizados con materiales reflectantes y suelen tener forma esférica, semiesférica o circular. Las formas y los tamaños de los marcadores dependen de las resoluciones de las cámaras y los sujetos de captura, y pueden variar desde los pocos milímetros de diámetro para capturas de áreas pequeñas (como las que se realizan en la cara o en las manos), hasta unos cuantos centímetros [11]. Los marcadores pasivos se colocan directamente sobre la piel del sujeto de captura o mediante velcro en prendas de una sola pieza fabricadas con materiales elásticos como el elastano. Las cámaras suelen disponer de sus propias fuentes de luz, habitualmente diodos emisores de luz (LED), que crean una reflexión direccional en los marcadores [19]. La luz emitida por los LED suele ser infrarroja, ya que ésta produce una menor distorsión visual en el sujeto de captura [11].

En los sistemas ópticos con marcadores activos (figura 3.3b), los marcadores son LED. Algunos sistemas iluminan un LED cada vez, eliminando la necesidad de identificar cada marcador. Otros sistemas iluminan todos los LED al mismo tiempo; en este caso, la modulación de la amplitud o la frecuencia de cada LED es lo que permite iden-

tificar los marcadores. Algunos de los sistemas con marcadores activos más recientes funcionan en entornos con luz natural, como los exteriores. Sin embargo, lo habitual es que los sistemas ópticos deban controlar cuidadosamente la iluminación, especialmente los sistemas con marcadores pasivos [19]. En estos casos, la captura se debe llevar a cabo en entornos controlados, alejados de la luz amarilla y del ruido reflectivo [11].

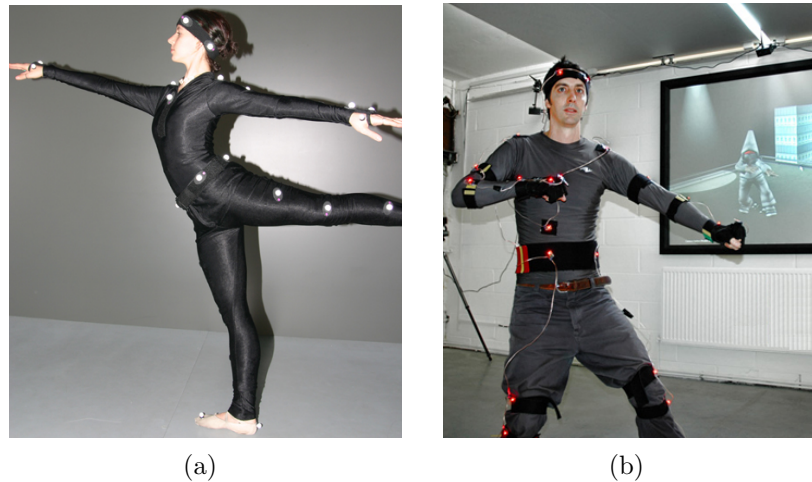


Figura 3.3: Sistemas ópticos. (a) Sistema óptico con marcadores pasivos de *Vicon*. (b) Sistema óptico con marcadores activos de *PhaseSpace*.

Las cámaras de un sistema óptico (pasivo o activo) capturan las luces reflejadas o emitidas por los marcadores con frecuencias comprendidas entre las 30 y las 2000 muestras por segundo. Para que se pueda determinar la posición tridimensional de un marcador es necesario que al menos dos cámaras tengan visión directa con éste, aunque para mejorar la precisión se prefieren tres o más. Esto no significa que disponer de un número elevado de cámaras sea lo más adecuado, ya que cada cámara adicional incrementa el tiempo de posprocesamiento [11]. En ocasiones, alguno de los marcadores de captura del sujeto puede quedar oculto a las cámaras. Por ejemplo, si un sujeto de captura se tumba boca abajo, los marcadores frontales quedarán ocultos. Cuando ninguna cámara puede ver un marcador, esto resulta en una pérdida de datos. Existen técnicas de edición de datos y herramientas para compensar la pérdida de datos, pero cuando son demasiados los marcadores que quedan ocultos o la duración de la obstrucción es demasiado larga, no es posible solucionar el problema. En general, cuando no aparecen problemas de ocultación, los datos generados por un sistema óptico actual son limpios y precisos [19].

Un sistema óptico se debe calibrar haciendo que todas las cámaras realicen el seguimiento de un objeto de dimensiones conocidas que el software pueda reconocer, como un cubo o una vara con marcadores reflectantes. Mediante la combinación de las vistas de todas las cámaras con las dimensiones conocidas del objeto se puede calcular

la posición exacta de cada cámara en el espacio. Si una cámara cambia de posición, incluso si es levemente, se debe realizar una nueva calibración del sistema. Aún así, el sistema se debe recalibrar cada pocos minutos de captura, puesto que cualquier tipo de movimiento o vibración puede cambiar la posición de la cámara [11]. En la figura 3.4 se muestran dos posibles configuraciones de un volumen de captura dependiendo del número de cámaras disponibles.

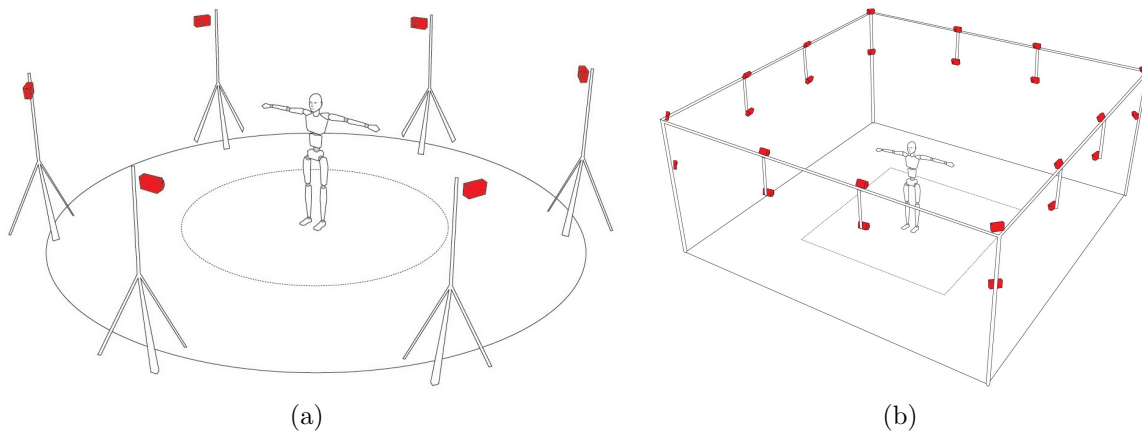


Figura 3.4: Configuraciones recomendadas por la empresa *OptiTrack* para sistemas ópticos con marcadores en función del número de cámaras. (a) Configuración con 6 cámaras: se consigue un diámetro máximo de trabajo de 6 m, equivalente a un diámetro de captura de 3 m. (b) Configuración con 24 cámaras: se consigue una superficie de trabajo de 6 m^2 , equivalente a una superficie de captura de 3 m^2 .

La configuración de los marcadores es flexible. Se pueden utilizar las configuraciones que el fabricante del sistema proporcione o se pueden diseñar unas propias que se adecúen a unas necesidades concretas. También es posible realizar el seguimiento de una gran cantidad de marcadores simultáneamente, por ejemplo, hasta 200 marcadores con un sistema de 16 cámaras. Puesto que la captura de múltiples sujetos a la misma vez tiende a causar problemas de ocultación, es habitual realizar la captura de un único sujeto cada vez, a menos que sea crucial que varios sujetos interactúen entre sí y que su sincronización sea importante. Los sujetos de captura se pueden mover con libertad dentro del volumen de captura porque no tienen ni equipos ni cables conectados a ellos [19].

Una vez que se han digitalizado las imágenes de la escena de captura, comienza el posprocesamiento. El primer paso consiste en obtener una representación de los marcadores. Se usan diferentes métodos de procesamiento de imágenes para minimizar el ruido y aislar los marcadores, separándolos del resto del entorno. El enfoque más básico consiste en separar todos los grupos de píxeles que exceden un umbral de luminosidad predeterminado. Si el software es lo bastante avanzado, se ayudará de muestras adyacentes para resolver cualquier muestra particular. El segundo paso es determinar las

coordenadas bidimensionales de cada marcador para cada vista de la cámara. Este dato se usará posteriormente, en combinación con las coordenadas de la cámara y el resto de las vistas de la cámara, para obtener las coordenadas tridimensionales de cada marcador. El tercer paso es identificar cada marcador a lo largo de una secuencia. Esta etapa requiere en gran medida la ayuda de un operador humano, ya que la asignación inicial de cada marcador se tiene que registrar de forma manual. Tras esta asignación, el software intenta resolver el resto de la secuencia hasta que pierde la pista de un marcador debido a su ocultación o a su cruce con otros. En este punto, el operador debe reasignar los marcadores en cuestión y se reanuda el cálculo. Este proceso continúa hasta que se resuelve toda la secuencia y se guardan en un archivo los datos posicionales de todos los marcadores. El archivo generado en este proceso contiene una secuencia con las posiciones globales de los marcadores en el tiempo [11].

Sistemas con marcadores (configuración de dentro hacia fuera)

En un sistema con marcadores con una configuración de dentro hacia fuera (también denominados sistemas videométricos [26]), los sensores ópticos se sitúan en el sujeto de captura y los marcadores se encuentran en la referencia. Esta técnica, a diferencia de la configuración de fuera hacia dentro, permite la medida de la posición y de la orientación si el sistema se equipa con un número suficiente de sensores y características [26].

Los marcadores que se encuentran en el punto de referencia tienen un patrón de características (por ejemplo, paneles en el techo) cuyas localizaciones en el espacio tridimensional son conocidas. Las cámaras adquieren diferentes vistas de este patrón. Las proyecciones en dos dimensiones del patrón en el sensor se pueden usar para definir un vector que va desde el sensor hasta una característica específica del patrón. La posición y la orientación del sujeto de captura se calcula a partir de, al menos, tres vectores construidos a partir de las características de los sensores.

El sistema de la figura 3.5 representa un sistema formado por cuatro cámaras localizadas en un soporte que el sujeto de captura debe llevar en la cabeza y un techo cubierto con diodos LED infrarrojos activados de forma secuencial. Se podría haber empleado una sola cámara, pero las medidas redundantes mejoran el seguimiento y varias cámaras permiten un rango de movimiento mayor, manteniendo la referencia (el techo) a la vista de forma constante.

Para recuperar la posición y la orientación de un objetivo se emplea una técnica matemática llamada *resección espacial por colinealidad* [28]. Este sistema de captura de movimiento tiene la ventaja de poderse escalar convenientemente mediante la adición de marcadores en la referencia (en el caso del ejemplo, paneles en el techo), que se

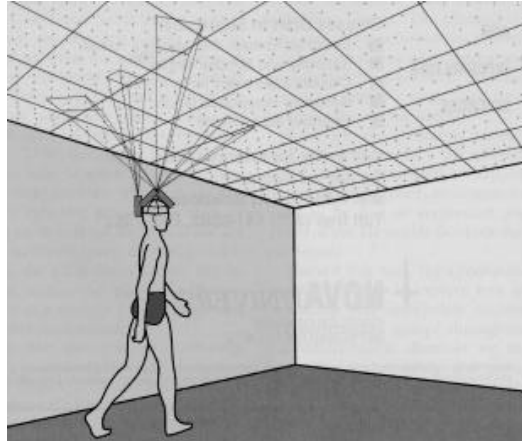


Figura 3.5: Sistema con marcadores con configuración de dentro hacia fuera.

deben colocar con precisión.

Con las configuraciones *de dentro hacia fuera* se suele obtener una mayor resolución y exactitud en la orientación que con las configuraciones *de fuera hacia dentro*. La misma rotación de un objetivo alrededor de un punto (por ejemplo, la cabeza de un sujeto de captura alrededor del cuello) producirá un mayor desplazamiento en el sensor de la cámara en una configuración *de dentro hacia fuera* que en una *de fuera hacia dentro*. Esto es así porque la relación del radio de la trayectoria de las características sobre las que se quiere hacer el seguimiento que siguen la rotación del objetivo o la rotación de la cámara es menor en la configuración *de fuera hacia dentro* que en la *de dentro hacia fuera* [26].

Sistemas basados en vídeo

Los sistemas ópticos sin marcadores (también denominados sistemas basados en imágenes o en vídeo) emplean técnicas de visión por ordenador para obtener los parámetros de movimiento directamente de las secuencias de vídeo. Estos enfoques son menos precisos que los sistemas ópticos con marcadores, sin embargo son más asequibles y portátiles. Aún así, no son del todo independientes, ya que requieren de una o más cámaras externas. Además, se ven afectados por problemas de campo visual, especialmente en el caso del vídeo monocular [18].

Los sistemas sin marcadores se pueden clasificar en función del número de cámaras que emplean (monocular o de visión múltiple), o de las señales de imagen a partir de las cuales se estima el movimiento (bidimensionales o tridimensionales) [29].

Los enfoques monoculares tienen la ventaja de que trabajan con una configuración de hardware sencilla, esto es, una cámara no calibrada. Esto los hace particularmente interesantes para aplicaciones de vigilancia donde una calibración con varias cámaras

no se puede llevar a cabo en muchos casos. Sin embargo, al menos por el momento, las ventajas de los sistemas con varios puntos de vista pueden superar con creces esta característica, a menos que se reduzcan de forma drástica los problemas de ocultación y ambigüedades en la apariencia.

Todos los métodos explotan la información de imágenes bidimensionales para realizar el seguimiento. Sin embargo, estas imágenes sólo ofrecen un débil apoyo al seguidor, que rápidamente lleva a esquemas de optimización sofisticados y más bien lentos. Varias cámaras calibradas permiten el cálculo de la forma tridimensional de la persona. La forma tridimensional sólo contiene información que es consistente en todas las vistas individuales que estén relacionadas con alguna hipótesis, y a continuación, se descarta, como por ejemplo, bordes muy juntos o vértices pronunciados en las siluetas.

Un problema común de los algoritmos basados en tres dimensiones es la baja exactitud de la reconstrucción, que depende en gran medida de la calidad de las imágenes de entrada y de la segmentación en primer plano. También, la localización de las partes del cuerpo es, con frecuencia, deficiente, ya que los procedimientos basados en vóxeles (píxeles tridimensionales) tienden a dar como resultado reconstrucciones voluminosas. La adición de entradas bidimensionales puede aumentar la exactitud del seguimiento, ya que ofrecen una mejor localización. Además, la fortaleza ante reconstrucciones tridimensionales erróneas se puede aumentar al mismo tiempo. Por lo tanto, es lógico combinar imágenes en dos y tres dimensiones para conseguir lo mejor de las dos tecnologías.

Haces de exploración

Esta técnica emplea haces ópticos de exploración sobre una referencia. Unos sensores localizados en el objetivo (el sujeto de captura) detectan el tiempo de barrido de los haces en su superficie. El tiempo se transforma en una variable (por ejemplo, un ángulo) que permite extraer la posición y la orientación del objetivo. El método de seguimiento de casco de Honeywell calcula el ángulo del haz sobre el sensor, a partir del tiempo de barrido, dada una posición conocida del casco. La figura 3.6 ilustra este principio para dos haces y dos sensores. En este caso sólo se puede medir el azimut y la elevación del objetivo. En configuraciones más complejas donde se usan varios emisores y sensores, se puede calcular mediante triangulación la posición tridimensional y la orientación de un objetivo a partir de medidas de los ángulos.

El método de seguimiento de Minnesota utiliza un láser para calcular la distancia entre sensores fijados a la estructura del escáner y sensores fijados al sujeto de captura. La distancia se calcula contando el tiempo transcurrido entre los dos sensores durante

un ciclo de barrido.

La técnica de los haces de exploración, que tiene una configuración *de dentro hacia fuera*, no comparte la ventaja de los sistemas con marcadores con configuración *de dentro hacia fuera*, que proporciona una mayor exactitud y resolución en la orientación de un objetivo. Dado que los receptores están en el objetivo (configuración *de dentro hacia fuera*), la exploración del volumen de captura se hace desde la referencia. Una configuración de este tipo se puede comparar con una configuración *de fuera hacia dentro*, donde una cámara está sujeta a la referencia y explora la escena.

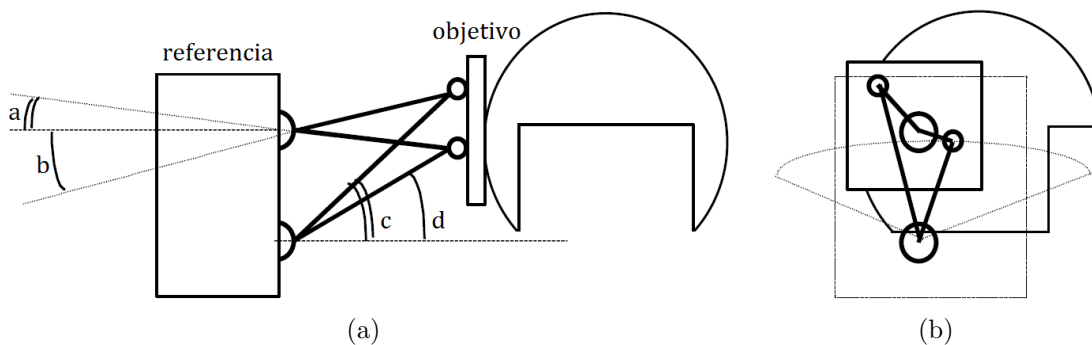


Figura 3.6: Estructura de un sistema de captura mediante haces de exploración, usado para determinar la orientación de la cabeza de los pilotos en la cabina de un avión (Honeywell). (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

3.3.2. Sistemas magnéticos

Los sistemas de adquisición de movimiento magnéticos utilizan sensores colocados en el cuerpo del sujeto de captura para medir los campos magnéticos generados por una fuente transmisora. La fuente transmisora está formada por tres bobinas ortogonales entre sí que emiten un campo magnético cuando se les aplica corriente. Los sensores miden la intensidad de estos campos, que es proporcional a la distancia de cada bobina desde el conjunto emisor de campo. Los sensores y la fuente están conectados a un procesador que calcula la posición y la orientación de cada sensor a partir de los valores de campo medidos [30].

El campo magnético terrestre también se puede usar como fuente para estimar la orientación. Aunque la forma del campo magnético terrestre varía hasta cierto punto a lo largo de la superficie del planeta, se pueden aplicar algunas técnicas para corregir las anomalías locales del campo. No obstante, la forma más común de realizar la adquisición de movimiento es induciendo las excitaciones activamente con un conjunto de bobinas actuando como fuente [16, 18].

Los seguidores magnéticos se pueden clasificar en dos categorías: los seguidores magnéticos de corriente alterna y los seguidores magnéticos de corriente continua.

Los seguidores magnéticos de corriente alterna constan de una fuente transmisora y un receptor. La fuente está formada por tres bobinas electromagnéticas mutuamente perpendiculares y está montada en una posición fija del entorno. El receptor tiene una construcción similar y se encuentra colocado en el sujeto de captura.

Cuando se introduce la señal de corriente alterna en las tres bobinas de la fuente, éstas producen un campo magnético. Este campo, a su vez, induce corrientes en las tres bobinas receptoras. Las corrientes varían en función de la posición y la orientación del receptor con respecto a la fuente. Una vez medidas las corrientes, estos valores se utilizan para calcular la posición y la orientación del receptor.

En presencia de objetos metálicos, los seguidores magnéticos de corriente alterna sufren el problema de la distorsión por corrientes parásitas (también conocidas como corrientes de Foucault). De acuerdo con la ley de Faraday, el campo magnético generado por la fuente induce corrientes parásitas en los objetos metálicos del entorno. Las corrientes parásitas, a su vez, generan sus propios campos magnéticos, que interactúan con el campo magnético de la fuente y lo distorsiona. Como resultado de esta distorsión, el seguidor ofrece resultados imprecisos sobre la posición y la orientación en las proximidades de los objetos metálicos. Esto impone limitaciones severas a los entornos en los que se pueden usar seguidores de corriente alterna [13].

Los seguidores magnéticos de corriente continua siguen una metodología de trabajo que evita la distorsión por corrientes parásitas en las proximidades de los metales. Las corrientes parásitas se generan por cambios en el campo magnético transmitido. Puesto que los seguidores de corriente continua emplean un campo magnético estático, evitan las corrientes parásitas.

Los seguidores de corriente continua utilizan un transmisor similar al que emplean los seguidores de corriente alterna, pero en lugar de excitarlos con corriente alterna, introducen en el transmisor pulsos cortos de corriente continua. Una vez que las perturbaciones causadas por la transición de un pulso de corriente continua se estabilizan, el campo magnético generado por el transmisor permanece estático hasta el final del pulso. El campo estático se mide en el receptor. La medida, sin embargo, incluye una componente importante del campo magnético terrestre. Para eliminar esta componente no deseada, se debe realizar una medida del campo magnético terrestre antes de excitar el transmisor. Esta medida se sustrae en las posteriores medidas del campo transmitido y el resultado se utiliza para calcular la posición y la orientación del sujeto de captura.

Aunque los seguidores de corriente continua evitan la distorsión causada por la inducción de las corrientes parásitas en metales, éstos siguen siendo igual de vulnerables

a los efectos de los materiales ferromagnéticos. En el caso de encontrarse presentes en las proximidades del seguidor, estos materiales distorsionarían el campo magnético transmitido por reflexión. Como consecuencia, la posición y la orientación proporcionada por los seguidores de corriente continua en presencia de materiales ferromagnéticos son imprecisas [13].

El enfoque más común para tratar estas distorsiones es asegurarse de que el volumen de captura no contiene ningún objeto que pueda causar el problema. Esta es la razón, por ejemplo, por la que las pantallas o los sistemas de visualización en estos entornos están basados en proyectores o fabricados en plástico. Si no se pueden eliminar los objetos problemáticos (quizás porque forman parte integral de la aplicación), es posible modelar y corregir las distorsiones resultantes [16].

Los seguidores de corriente alterna utilizan campos con una o más frecuencias en sus fuentes generadoras. Si se emplease una única frecuencia en los tres ejes, sólo se podría activar una bobina cada vez para conocer con precisión dónde se origina el campo. Este enfoque se suele denominar de *multiplexación en tiempo*, puesto que las tres bobinas se activan en diferentes momentos. Si se usan tres frecuencias, las tres bobinas se pueden activar simultáneamente. Esto tiene muchas ventajas, pero también incrementa la complejidad y el coste. A este enfoque se le suele conocer como *multiplexación en frecuencia*. Los seguidores de corriente continua están siempre multiplexados en tiempo, puesto que no hay forma de distinguir un eje del otro si se activa más de uno a la vez [31].

Los datos generados por los sistemas magnéticos son diferentes a los ópticos, ya que contienen información sobre la rotación y la traslación de los sensores. De esta forma, no se requiere posprocesamiento para calcular las rotaciones. Esto permite que los sistemas magnéticos se puedan emplear en aplicaciones en tiempo real [19, 23]. Además, el hecho de que un seguidor magnético pueda proporcionar datos sobre la posición y la orientación significa que requiere menos marcadores que su homólogo óptico [11].

Los sujetos de captura o los accesorios hechos de materiales no metálicos no pueden ocultar los sensores de seguimiento, lo que supone una ventaja sobre los sistemas ópticos [13, 15, 19, 23].

El cableado y las baterías de los sensores de seguimiento pueden limitar los movimientos del sujeto de captura. Además, las baterías de los sensores de movimiento se tienen que recargar cada pocas horas [19, 23].

Las tasas de muestreo de los sistemas magnéticos (de hasta 144 y 240 muestras por segundo) son menores que las de los sistemas ópticos y los datos magnéticos suelen contener ruido. Las configuraciones de los sensores no se pueden cambiar tan libremente como las configuraciones de marcadores de los sistemas ópticos. Los sistemas magnéti-

cos pueden capturar a varios sujetos simultáneamente con varias configuraciones. Los volúmenes de captura de los sistemas magnéticos son normalmente menores que en los sistemas ópticos. Una de las mayores ventajas de los sistemas magnéticos es su coste, ya que son menos caros que los sistemas ópticos [19].

3.3.3. Sistemas mecánicos

Los sistemas de adquisición de movimiento mecánicos miden directamente los ángulos de las articulaciones del cuerpo. Para ello, el sujeto de captura debe llevar puesto un dispositivo articulado, a modo de estructura externa, formado por varillas rectas unidas a sensores angulares (como potenciómetros u otros dispositivos similares) en las articulaciones del cuerpo. El conjunto está diseñado para medir los ángulos de las articulaciones a medida que el sujeto de captura se mueve. Usando el conocimiento previo de las piezas mecánicas rígidas y las medidas directas de los sensores, se puede estimar la posición del sujeto de captura con respecto al entorno. Estos dispositivos también reciben el nombre de exoesqueletos por la forma en la que los sensores se acoplan al cuerpo [11, 16, 19].

Los sistemas mecánicos son sistemas en tiempo real, relativamente económicos, sin problemas de ocultación de sensores, libres de interferencias magnéticas o eléctricas y altamente portátiles. Además, los sistemas mecánicos inalámbricos proporcionan grandes volúmenes de captura. Sin embargo, uno de los grandes inconvenientes de los sistemas mecánicos es su incapacidad para medir translaciones globales. En la práctica, esto significa que no realizan un buen trabajo cuando los pies del sujeto de captura abandonan el suelo. Por ejemplo, si el sujeto sube por unas escaleras, los datos nunca reflejan el desplazamiento vertical en el aire, sino que éstos se interpretan como si se estuviera andando en el mismo lugar. Lo mismo ocurre si el sujeto salta, ya que los datos no reflejarían el salto. En muchos casos se añade un sensor magnético a la configuración para resolver este problema, pero esto añade algunas de las desventajas de los sistemas magnéticos, como la sensibilidad a los metales cercanos [11, 19].

Además, el diseño de muchos de estos dispositivos se basa en la suposición de que muchos huesos humanos están conectados mediante articulaciones en bisagra sencillas, por lo que no se tienen en cuenta las rotaciones no estándares que son comunes en las articulaciones humanas, como las del complejo del hombro o las de las muñecas [11].

El volumen del dispositivo y su fragilidad también restringen el movimiento del sujeto de captura. No es fácil realizar movimientos rápidos y expresivos debido al peso del exoesqueleto y al rango limitado de los dispositivos de medida angular, y son incómodos de llevar durante largos periodos de tiempo. Un sujeto de captura con

un sistema exoesquelético articulado probablemente no pueda rodar por el suelo, bien porque puede dañar el dispositivo o bien porque puede lesionarse con él puesto [18, 19, 23].

Algunos sistemas mecánicos [32] utilizan cordones de fibra óptica flexible, que son más cómodos, ligeros y duraderos que los sistemas exoesqueléticos rígidos (figura 3.7). A lo largo de cada cordón hay situados un conjunto de sensores de fibra óptica que, a partir de la información de doblado y torsión de éste, permiten obtener series de datos con su forma en tiempo real.



Figura 3.7: Sistema mecánico flexible de fibra óptica desarrollado por *Measurand*.

Estos sistemas pueden adquirir el movimiento de casi cualquier parte del cuerpo, y no requieren de trajes especiales para su uso, ya que los cordones de fibra óptica pueden adaptarse al sujeto de captura mediante cintas elásticas. No obstante, las aplicaciones de estos sistemas no sólo se limitan a la captura de movimiento humano, sino que también se pueden usar en simulaciones de accidentes, control de robots, diseño asistido por ordenador, etc. Las únicas aplicaciones para las que estos sistemas de fibra óptica no están recomendados son aquéllas que implican la medida de curvaturas muy pequeñas, del rango de milímetros por decenas de metros, como la medida de la desviación de un puente o el ala de un avión. Son inalámbricos y su área de captura se extiende hasta los 200 m².

3.3.4. Sistemas inerciales

Los sistemas inerciales utilizan acelerómetros y giroscopios que se colocan en el sujeto de captura para calcular los cambios en la posición y la orientación a partir de medidas de la aceleración y la velocidad [13, 18].

Los sistemas de navegación inerciales (en inglés *inertial navigation systems* o INS) se generalizaron en barcos, submarinos y aeroplanos en la década de 1950, antes de que se concibieran los gráficos por ordenador o la realidad virtual. Sin embargo, fueron

los últimos sistemas en introducirse como dispositivos de adquisición de movimiento. La razón es sencilla: un INS contiene giroscopios, y los primeros giroscopios de gran precisión eran demasiado pesados como para ajustarlos en el cuerpo de una persona. No fue hasta la década de 1990, con la aparición de los sistemas microelectromecánicos (en inglés *microelectromechanical systems* o MEMS) y su aplicación a los INS, que no comenzó el desarrollo de los sistemas inerciales [16].

Los sistemas inerciales miden el ritmo de aceleración y rotación mediante varias técnicas. Los cambios de posición se calculan mediante el uso de acelerómetros, y la orientación mediante el uso de giroscopios (figura 3.8). Como su nombre indica, los acelerómetros miden aceleraciones y no distancias; de esta forma, las lecturas se deben integrar dos veces para calcular la posición. De manera similar, los giroscopios miden el ritmo de rotación (velocidad angular), y los valores obtenidos se deben integrar una vez para obtener la orientación.

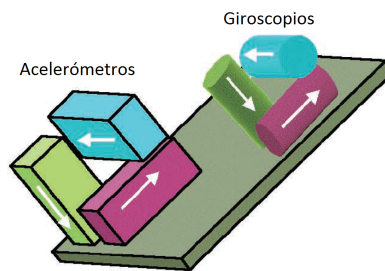


Figura 3.8: Componentes internos básicos de un dispositivo inercial. La figura muestra componentes capaces de detectar desplazamientos y rotaciones en los tres ejes del espacio.

Puesto que el ruido en la salida de un sensor inercial no se puede distinguir de la señal, el sistema tiene que integrar el ruido junto con la señal. Esto es más complicado en el caso de los acelerómetros, puesto que el vector de gravedad se incluye en sus medidas de la aceleración. Es difícil medir la orientación exacta del vector de gravedad para eliminarlo completamente sin dejar un ruido adicional en las señales del sensor. El resultado es que la posición y la orientación calculada se desviará en el tiempo incluso si no hay movimiento. Esta desviación, que se conoce con el nombre de deriva, se debe tratar usando referencias de posiciones y orientaciones externas. Por ello, los sistemas inerciales casi siempre se combinan con otras tecnologías [17].

Los sensores inerciales son completamente independientes, pues no tienen requisitos de campo visual, ni de instalación de emisores, ni de sensibilidad a los campos electromagnéticos interferentes o al ambiente ruidoso. También tienen muy baja latencia (normalmente de un par de milisegundos o menos), pueden medir con una tasa de muestreo relativamente grande (miles de muestras por segundo), y la velocidad y la

aceleración medidas pueden usarse generalmente para predecir la posición de la cabeza o una mano con 40 ó 50 ms de antelación. Los sensores inerciales óptimos también ofrecen un *jitter* (fluctuaciones de la frecuencia) extremadamente bajo [16].

La debilidad más importante de los seguidores inerciales son las desviaciones (o derivas). Si uno de los acelerómetros tiene un error de desviación de sólo 1 mG (una milésima parte de la gravedad terrestre), la posición de salida obtenida divergirá de la posición real con una aceleración de $0,0098 \text{ m/s}^2$. Tras 30 segundos, las estimaciones se habrían desviado 4,5 metros. Un error de orientación de los giroscopios de 1 milirradián produciría un error de compensación de la gravedad de 1 mG en uno de los acelerómetros horizontales, provocando un gran desajuste [16].

Incluso los mejores giroscopios tienen desviaciones del orden de miliradianes en periodos cortos de tiempo. Sin embargo, dadas las ventajas enumeradas, los sensores inerciales pueden resultar muy valiosos cuando se combinan con otras tecnologías. Los sensores inerciales han servido de base para varios sistemas híbridos con buenos resultados [13, 16].

3.3.5. Sistemas acústicos

Los dispositivos de seguimiento acústicos hacen uso de la velocidad del sonido a través de un medio (normalmente el aire) para calcular la distancia entre un emisor y un detector. Los sistemas acústicos iniciales transmitían uno de estos dos tipos de señal: un pulso (en banda ancha o estrecha) o una onda continua (también llamados sistemas de fase coherente).

El primer sistema acústico fue la *Lincoln Wand* [33]. Este sistema empleaba un dispositivo con forma de bolígrafo con un emisor ultrasónico en su extremo para crear un pulso sonoro de banda ancha (20 kHz a 100 kHz). El sistema medía el tiempo que empleaba este pulso en alcanzar cuatro micrófonos (tiempo de vuelo) y, a continuación, usaba la velocidad del sonido para calcular la distancia a cada micrófono. Este enfoque tiene dos problemas: la limitada tasa de muestreo y la susceptibilidad al ruido. Puesto que la *Lincoln Wand* usaba pulsos sonoros, unos pulsos eran indistinguibles de los otros. Esto significa que era necesario esperar a que los ecos de un pulso se atenuaran antes de generar el siguiente pulso, que podía requerir muchos milisegundos dependiendo del entorno. Por esta razón, sólo una fuente de sonido podía estar transmitiendo cada vez. Si la *Lincoln Wand* hubiera usado dos dispositivos emisores, cada uno con una fuente de ultrasonidos, la transmisión tendría que haberse hecho por turnos, dividiendo entre dos la tasa de actualización efectiva de cada uno. El otro problema es que este sistema no podía distinguir entre ciertos ruidos del entorno y el sonido del pulso. Cualquier

sonido con forma de pulso de banda ancha, como una palmada, podría confundirse con un pulso [17].

El siguiente sistema acústico en aparecer fue el sistema de fase coherente de Ivan Sutherland [34]. Este sistema usaba sonidos de onda continua para medir una distancia. Una onda senoidal de cierta frecuencia sonaba de forma continua y la fase de la señal recibida se comparaba con la de la señal transmitida. La diferencia de fase entre estas dos señales era el resultado del retraso de propagación a través del aire. Sutherland usó sonido en el rango de los 37–41 kHz y así, la longitud de onda del sonido (ligeramente menor que 1 cm) era mucho más corta que las distancias que quería medir. Como resultado, el rango de medidas a partir de las diferencias de fase era ambiguo. Una diferencia de fase de ϕ no se podía distinguir de una diferencia de fase de $2\pi n + \phi$ (donde n es un valor entero). Es decir, sólo se podían medir cambios de distancia relativos dentro de un ciclo. Para medir distancias absolutas propuso conocer la distancia inicial y a continuación llevar la cuenta del número de ciclos acumulados n [16, 17].

Applewhite [35] intentó mejorar la idea de la fase coherente modulando la amplitud de la onda senoidal, aunque con este enfoque la señal contiene ambigüedades más difíciles de resolver que con una sola frecuencia portadora [17].

Los sistemas de fase coherente permiten que las medidas se puedan tomar con mayor frecuencia, pero no resuelven los otros problemas que ocurrían con la *Lincoln Wand*, como el de las reflexiones multicamino. El término *multicamino*, normalmente asociado a radiotransmisión, indica que la señal recibida es, a menudo, la suma de la señal directa y una o más señales reflejadas (o ecos) con recorridos más largos. Puesto que las paredes y los objetos de una habitación son extremadamente reflectantes para las señales acústicas, la amplitud y la fase de la señal recibida de un emisor variará de forma drástica e impredecible ante cambios en la posición del receptor. Esto resulta en una estimación incorrecta de la distancia. Del mismo modo, cualquier ruido externo a la frecuencia de la señal puede dar como resultado medidas erróneas de la distancia por la misma razón [16, 17].

Muchos de los sistemas de seguimiento acústicos modernos emplean pulsos de banda estrecha en el rango de los ultrasonidos (normalmente en el rango de los 40–50 kHz). Los transductores que funcionan en esta frecuencia tienden a ser de banda estrecha (aproximadamente 5 kHz) y por ello los pulsos son de banda estrecha. La ventaja es que el sonido es inaudible, pero estos sistemas tienen los mismos problemas que los sistemas de pulsos de banda ancha, como la baja tasa de actualización y la alta sensibilidad al ruido. Por ejemplo, el tintineo de unas llaves tiene un importante contenido frecuencial en este rango ultrasónico [17].

Un problema adicional al que todos los sistemas acústicos se tienen que enfrentar

son las ocultaciones de los sensores. A frecuencias ultrasónicas, los objetos situados entre el emisor y el sensor bloquean el sonido, y por lo tanto, impiden el cálculo de la distancia. Sin embargo, el sonido de baja frecuencia se difracta alrededor de los objetos. Otro problema es la variación de la velocidad del sonido con las condiciones atmosféricas. Una forma de determinar la velocidad del sonido es fijar la posición de un objetivo y calcularla. No obstante, la precisión de la velocidad del sonido no es tan importante siempre y cuando las distancias que se han de medir se mantengan pequeñas [17].

3.4. Dispositivos comerciales

A continuación se describen brevemente diferentes dispositivos comerciales capaces. Se han ordenado según la tecnología empleada, y dentro de cada una de ellas se han agrupado por el tipo de aplicación al que van destinadas, resaltando aquellas características más relevantes para la ejecución en el contexto del proyecto.

3.4.1. Dispositivos ópticos

La mayoría de los dispositivos de captura de movimiento ópticos que se pueden encontrar a nivel comercial se componen de un conjunto de cámaras que realiza el seguimiento de varios marcadores. El seguimiento en estos sistemas con marcadores puede ser, como se describió en la clasificación de la sección 3.2, tanto *de dentro hacia fuera* como *de fuera hacia dentro*. Por otro lado, es frecuente encontrar en el mercado dispositivos que hacen uso de cámaras pero que no requieren ningún tipo de marcador para hacer el seguimiento; son los conocidos como sistemas sin marcadores o basados en imágenes. Y también, en menor medida, existen dispositivos híbridos que se sirven del láser como tecnología de apoyo.

En las siguientes secciones se reseñan algunos dispositivos comerciales actuales incluidos en cada uno de los tres grupos señalados.

Sistemas con marcadores

Existen varios modelos comerciales de sistemas ópticos *de fuera hacia dentro* que emplean marcadores reflectantes (o pasivos). Por ejemplo, los *Foundation Packages* de *OptiTrack* [36] (figura 3.9) proporcionan todos los elementos necesarios para disponer de un sistema de captura de movimiento óptico: cámaras, software, dispositivos de calibración, cables y otros componentes electrónicos. Se requieren al menos seis cámaras para establecer un volumen de captura mínimo, aunque se recomiendan ocho o más

(hasta veinticuatro) para conseguir un seguimiento mejorado. Cada una de estas cámaras (que permite velocidades de captura de hasta 100 fps) tiene un precio aproximado de 450 euros. De esta forma, un sistema con todos los componentes necesarios viene a costar entre 4500 (con 6 cámaras) y 13 000 euros (con 24 cámaras).

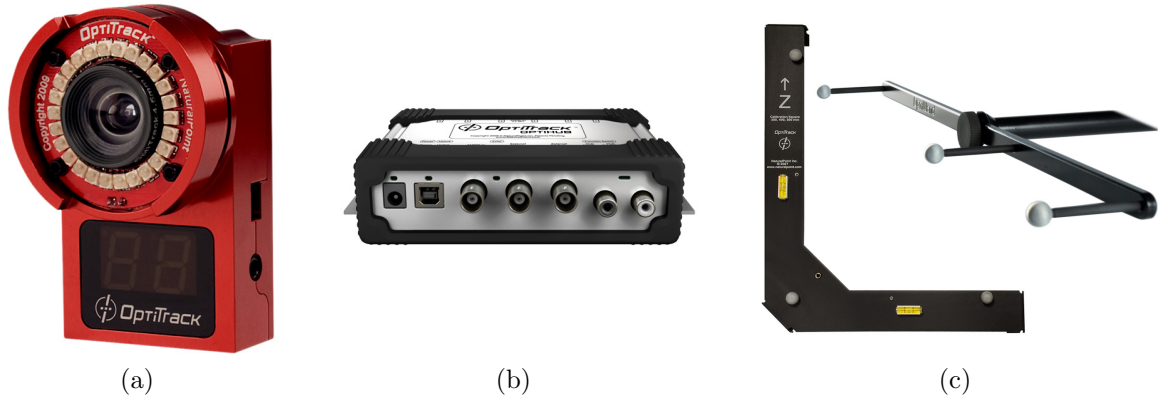


Figura 3.9: Algunos componentes incluidos en los sistemas ópticos *Foundation Packages* de *OptiTrack*. (a) Cámara *FLEX:V100R2*, dependiendo del paquete adquirido habrá entre 6 y 24 unidades. (b) Concentrador USB *OptiHub*; (c) Escuadra de calibración (izq.) para el montaje de los trípodes y vara de calibración *OptiWand* (der.) para la calibración de las cámaras.

El *MX* de *Vicon* [37] es otro sistema óptico con marcadores pasivos que proporciona las cámaras, el hardware de control y el software para analizar y presentar los datos. *Vicon* dispone en su catálogo de varios sensores ópticos y cámaras, siendo el modelo más reciente la cámara *Bonita* (figura 3.10a), con una velocidad de captura de 240 fps y un precio aproximado de 2200 euros [20].

Se pueden encontrar sistemas similares a los dos mencionados anteriormente que emplean marcadores generadores de luz (o activos) para realizar el seguimiento de los sujetos de captura. Éste es el caso del *Precision Position Tracker (PPT)* de la empresa *WorldViz* [38], que puede ofrecer volúmenes de captura de hasta $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 50\text{ m}$ y puede realizar el seguimiento de hasta 32 marcadores (figura 3.10b) con un máximo de 32 cámaras (figura 3.10c). El precio de un sistema con sólo dos sensores está en torno a los 7800 euros [20].

Otro método para realizar la adquisición de movimiento mediante cámaras es el propuesto por *ReActor2* de *Ascension* [39] (figura 3.11a). Se trata de una estructura cúbica formada por doce barras horizontales y verticales que alojan un gran número de detectores de infrarrojos (hasta 512) y otros componentes electrónicos. Éstos realizan un reconocimiento de marcadores automático y transfieren los datos a un ordenador. El sujeto de captura, que debe llevar un traje elástico con 30 marcadores activos infrarrojos, tiene total libertad para moverse en el interior de esta estructura (cuyo volumen de captura puede ser de hasta $3.0\text{ m} \times 4.2\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ dependiendo del modelo) y obtiene

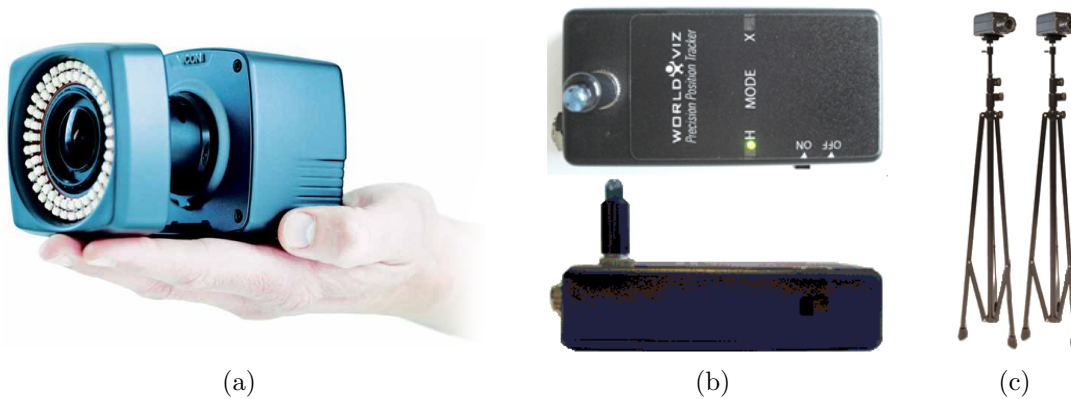


Figura 3.10: Sistemas ópticos de *Vicon* y *WorldViz*. (a) Cámara *Bonita* del sistema de captura óptico *MX* de *Vicon*. (b) Marcadores activos del sistema *PPT* de *WorldViz*, de $8 \times 4 \times 2$ cm de tamaño y 60 g de peso. (c) Cámaras del sistema *PPT* de *WorldViz*.

realimentación en tiempo real. Este dispositivo no requiere un gran mantenimiento, ya que carece de partes móviles y no es necesario calibrar continuamente las cámaras. Sin embargo su precio es bastante elevado, ya que supera los 60 000 euros [20].

Las aplicaciones que los fabricantes sugieren para este tipo de sistemas ópticos *de fuera hacia dentro* se pueden englobar en tres categorías diferentes: por un lado, se encuentran las aplicaciones que se relacionan con las ciencias de la vida, como pueden ser el estudio de la locomoción humana, la rehabilitación, la investigación biomecánica, el control de la postura y el equilibrio, el rendimiento deportivo o incluso la ciencia animal. Por otro lado, están las aplicaciones orientadas a la animación, que incluyen el desarrollo de videojuegos y la producción de películas. Por último, se encuentran los estudios en el ámbito de la ingeniería, entre los que destacan los orientados a la ergonomía y los factores humanos, la evaluación de las interacciones hombre-máquina, la manipulación y la visualización de gráficos de simulaciones, etc. [37]

En cuanto a sistemas ópticos enteramente *de dentro hacia fuera* (y no híbridos, como el dispositivo que se describe en la sección 3.4.4), se encuentra el *HiBall-3100* de *3rdTech* [40] (figura 3.11b). Se trata de un dispositivo de seguimiento compuesto por dos elementos integrados: un sensor óptico y una serie de balizas (LED infrarrojos) colocadas en el techo. El sensor se compone de seis lentes y fotodiodos dispuestos de tal forma que cada uno de ellos puede «ver» los LED del techo. Al colocar este sensor en el sujeto de captura se consiguen medidas bastante precisas de su posición a lo largo de todo el volumen de captura.



Figura 3.11: Sistemas ópticos de *Ascension* y *3rdTech*. (a) Estructura *ReActor2* de *Ascension*. (b) Sistema óptico *de dentro hacia fuera HiBall-3100* de *3rdTech*; la mano se muestra sujetando el sensor, mientras que las balizas se encuentran detrás de ella.

Sistemas sin marcadores

Entre los dispositivos que emplean tecnologías de captura de movimiento sin marcadores se pueden encontrar sistemas basados en vídeo y seguidores oculares. Los seguidores oculares miden el punto en el que se fija el ojo del sujeto de captura o el movimiento del ojo relativo a la cabeza. Como el movimiento capturado por estos dispositivos no representa ningún desplazamiento en el espacio, no se analizarán aquí. En cuanto a los sistemas basados en vídeo, en el mercado pueden encontrarse tanto dispositivos o sistemas preparados para su uso inmediato como empresas que ofrecen servicios profesionales con esta tecnología. Normalmente, estas empresas de servicios de captura de movimiento suelen enfocar su actividad a las industrias cinematográfica, televisiva o del videojuego.

Entre los dispositivos comerciales se encuentra el sistema de seguimiento de vídeo automático *Motus*, de *Vicon* [37]. Permite realizar el seguimiento de patrones especificados por el usuario, imagen a imagen, sin marcadores ni intervención manual. Si la imagen contiene un patrón distinguible que es visible a lo largo de varios fotogramas consecutivos, el sistema puede reconocer un punto dentro del patrón y seguirlo de forma automática durante toda la secuencia. Otros sistemas de captura similares son los que ofrece *Organic Motion* [41] (*Stage*, *Biostage* y *Openstage*). Su modo de funcionamiento es similar al anterior, puesto que también combina el seguimiento predictivo con la visión por ordenador.

Entre las aplicaciones hacia las que se orientan los dos sistemas comentados anteriormente se encuentran el estudio sobre el rendimiento deportivo, el análisis de la locomoción humana, la rehabilitación, la fisioterapia, estudios sobre la ortopedia, la ergonomía, el equilibrio y todos aquéllos relacionadas con la investigación biomecánica

en general.

Por otro lado están las empresas que ofrecen servicios de captura. *Mova* [42] está especializada en la captura de movimiento facial, de gran precisión y sin emplear marcadores. En este sistema, denominado *Contour Reality Capture*, sólo se emplea un maquillaje luminiscente especial que cubre por completo la superficie de la piel del sujeto. Este maquillaje permite que un conjunto de cámaras capture cerca de un millón de puntos por cada imagen. Tras la captura, se requiere que un equipo humano realice un posprocesamiento con los datos obtenidos.

Otra empresa similar es *Image Metrics* [43]. La tecnología que emplea no necesita pintura ni ninguna otra instrumentación para realizar la captura. En su lugar, se aplican técnicas de visión por ordenador basadas en modelos que permiten incluso transformar automáticamente las caras humanas en los personajes de un juego o una película [44].

3.4.2. Dispositivos magnéticos

La mayoría de los dispositivos de captura de movimiento magnéticos que se encuentran en el mercado en la actualidad se componen habitualmente de un transmisor y de uno o varios sensores. El transmisor, que puede trabajar en corriente continua o alterna, es el componente encargado de generar el volumen de captura, y suele tener unas dimensiones mayores que los sensores. Éstos, a su vez, pueden tener múltiples formas y tamaños en función de las aplicaciones a las que van dirigidos, siendo la más habitual la de una caja rectangular de pequeñas dimensiones.

Uno de los dispositivos más económicos que reúne las características descritas anteriormente es el *Minuteman* de la empresa *Polhemus* [45] (figura 3.12a), dedicada al desarrollo de seguidores magnéticos de corriente alterna [31]. *Minuteman* sólo puede controlar un máximo de dos sensores (que deben permanecer unidos al generador mediante un cable) y, a diferencia del resto de sistemas magnéticos, sólo ofrece tres grados de libertad en lugar de seis. Su precio se sitúa en torno a los mil euros [20].

Polhemus también dispone en su catálogo de otros dispositivos similares que mejoran las características de *Minuteman* a cambio de un precio mayor. Así, por unos 2200 euros [20], el modelo *Patriot* (figura 3.12b) añade los seis grados de libertad en sus sensores (sólo puede controlar dos como máximo); el modelo *Fastrak* (en torno a los 4700 euros [20]) incluye la posibilidad de controlar hasta cuatro sensores, repartiendo entre éstos su velocidad de actualización de 120 Hz; y el modelo *Liberty* (figura 3.12c), de unos 7200 euros [20], permite el control de hasta dieciséis sensores, con una velocidad de actualización de 240 Hz a repartir entre ellos. Existen también versiones de dos de estos modelos (el *Patriot Wireless* y el *Liberty Latus*) en los que el seguimiento de sus

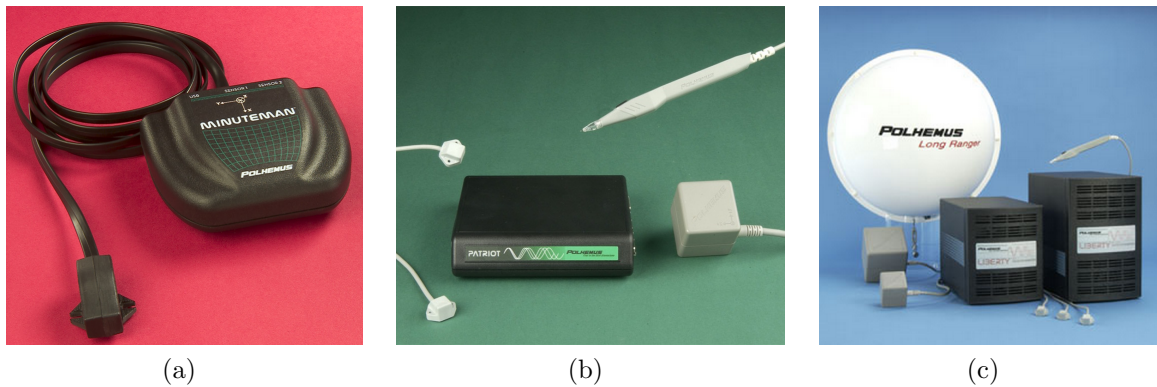


Figura 3.12: Sistemas magnéticos de *Polhemus*. (a) Sistema *Minuteman*; incluye un dispositivo electrónico portátil con una fuente magnética integrada y un sensor externo con un cable de quita y pon de dos metros de longitud. (b) Sistema *Patriot*; consta de una fuente y un sensor con forma de pequeña caja. En la figura se muestran otros posibles sensores con otras formas. (c) Sistema *Liberty*; incluye una unidad electrónica del sistema (en la figura se muestran dos modelos diferentes), un sensor y una fuente. En la figura también se muestran sensores adicionales y una fuente de mayor alcance.

sensores se realiza de forma inalámbrica.

Ascension [39] es otra empresa que desarrolla dispositivos con tecnología magnética usando generadores de corriente continua. En la línea de los dispositivos descritos anteriormente se encuentra *Flock of Birds*, que permite el control de hasta cuatro sensores simultáneamente. Dispone de dos tipos de transmisores: uno de corto alcance (unos 3 metros), orientado a la realidad virtual, a las simulaciones y a aplicaciones en las que el sujeto de captura deba permanecer sentado; y otro de largo alcance (unos 11 metros), dirigido a la animación, la biomecánica y otras aplicaciones en las que el sujeto deba caminar dentro del volumen de captura. Dependiendo del número de sensores que se adquieran (entre uno y cuatro), su precio oscila entre los 1800 y los 6200 euros para el transmisor de corto alcance, y entre los 5800 y los 10200 euros para el de largo alcance [20].

Para realizar el seguimiento con un número elevado de sensores, *Ascension* dispone del modelo *MotionStar* y su versión inalámbrica, *MotionStar Wireless 2*, que permiten el control de hasta 108 y 120 sensores respectivamente. Una de las versiones más básicas de *MotionStar*, con un transmisor de largo alcance y cuatro sensores, supera los 13300 euros.

Ascension también ofrece dispositivos específicos que permiten realizar el seguimiento de instrumental médico con tecnología magnética, como son *driveBAY*, *trakSTAR* y *medSAFE* (figura 3.13a). Estos dispositivos están diseñados para realizar el seguimiento de sensores miniaturizados, permitiendo así la localización y navegación de catéteres, sondas, agujas para biopsia, etc., dentro del cuerpo humano. Estos sensores, a diferen-

cia de los modelos comentados anteriormente, tienen un diámetro comprendido entre los 8 y los 0,9 mm, lo que permite la orientación del instrumental médico de forma poco invasiva. Dependiendo del modelo se pueden controlar hasta 16 sensores, y su precio de uno de estos equipos es superior a los 1900 euros [39].

La tecnología magnética aplicada a la captura de movimiento también se emplea en otros dispositivos con usos más específicos, como pueden ser HMD (*head mounted displays*), controladores o mandos, digitalizadores, etc. Por ejemplo, *Polhemus* ha desarrollado *SCOμT*, un HMD que está considerado como el único del mercado con 6 grados de libertad y autosuficiente, ya que comunica su posición y orientación directamente al ordenador, eliminando la necesidad de una unidad electrónica [45].

En cuanto a los controladores con tecnología magnética, se pueden encontrar el *3D Navigator* de *Ascension* [39], que permite una operación inalámbrica en todo tipo de entornos inmersivos (como la realidad virtual), o el *TrueMotion* de *Sixense* [46], que está enfocado exclusivamente al control de videojuegos.

Otra aplicación con esta tecnología es el digitalizador *Patriot Digitizer* de *Polhemus* [45]. Se trata de un dispositivo que permite la digitalización manual de objetos tridimensionales. Esto se consigue moviendo libremente un sensor con forma de lápiz alrededor del contorno del objeto que se desea digitalizar. Este objeto se deberá encontrar dentro del volumen de captura del dispositivo, que tiene un alcance de entre 1,5 y 3 metros.

Por último, cabe mencionar también el *Space Pad* de *Ascension* [39] (figura 3.13b). Este dispositivo es un seguidor no muy caro (superior a los mil euros) y de corto alcance (hasta medio metro) compuesto por un transmisor plano a modo de alfombrilla redonda. Se puede colocar tanto en el suelo como en la pared y permite controlar hasta cuatro sensores a la vez.

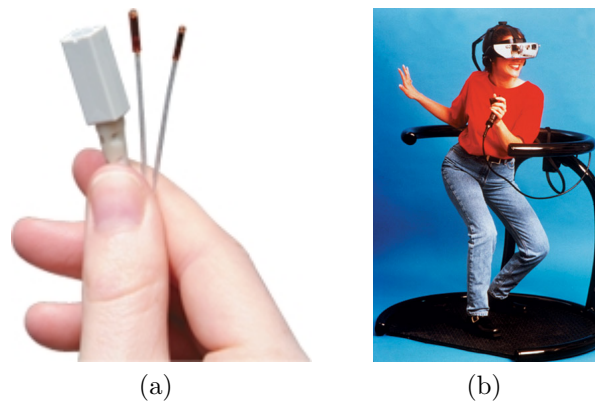


Figura 3.13: Sistemas magnéticos de *Ascension*. (a) Sistema *medSAFE*. (b) *Space Pad*.

3.4.3. Dispositivos mecánicos

Los sistemas mecánicos comerciales se pueden clasificar en dos grandes grupos: por un lado los que hacen uso de las tecnologías clásicas (como por ejemplo los potenciómetros), y por otro los que emplean tecnologías más recientes, basadas en fibra óptica.

Entre las empresas que ofrecen dispositivos mecánicos comerciales se encuentra *Animazoo* [47]. Dispone de un amplio catálogo de dispositivos, dependiendo de las articulaciones que se deseen medir; el más reciente y completo es el *Gypsy6* (figura 3.14a). Se trata de un traje formado por un conjunto de varillas que se adaptan al cuerpo del sujeto de captura como un exoesqueleto. Está compuesto por 37 potenciómetros que permiten obtener las medidas de 17 articulaciones. Este modelo, además, se caracteriza por haber sustituido la unidad espinal (una varilla que en versiones anteriores del modelo recorría la columna) por 2 giroscopios inerciales, lo que mejora su flexibilidad en el tronco superior. Su precio está en torno a los 22 000 euros. Existe una variante de este modelo que permite operación inalámbrica; su precio en este caso se incrementa en un 25 % [20].



Figura 3.14: Sistemas mecánicos. (a) Sistema *Gypsy6* de *Animazoo*, de varillas rígidas. (b) Sistema *ShapeWrap III* de *Measurand*, de varillas flexibles.

En lo que se refiere a dispositivos que funcionan con fibra óptica, destaca la empresa *Measurand* [32] con su dispositivo *ShapeTape*. Se trata de un sensor basado en fibra óptica, tridimensional, de doblamiento y torsión, que puede proporcionar de forma continua información precisa sobre su posición y su orientación a lo largo de su longitud. Este dispositivo puede usarse tanto por sí mismo como formando parte de una estructura o sujeto de captura. Es un dispositivo muy útil para generar imágenes tridimensionales por ordenador en tiempo real y recoger los datos correspondientes a formas complejas. El *ShapeWrap III* (figura 3.14b) es un traje formado por varios *ShapeTape* individuales y otros sensores de orientación que permite capturar el movimiento, en tiempo real, de las articulaciones más relevantes del sujeto de captura. Su

precio está en torno a los 24 000 euros [20].

Existe una versión del *ShapeTape*, en un formato mucho más reducido, llamada *ShapeSensor*. Puede utilizarse para medir el ángulo de cualquier articulación pequeña con un solo grado de libertad, como por ejemplo los dedos de las manos y los pies, o cualquier otra parte mecánica. El *ShapeHand* (también de *Measurand*) es un guante que permite capturar el movimiento de los dedos y la mano; está formado por cuarenta sensores similares al *ShapeSensor*. Su precio es de unos 8300 euros [20].

3.4.4. Dispositivos inerciales

Los sistemas inerciales más básicos se comercializan como unidades de medida inercial (en inglés *inertial measurement units* o IMU), es decir, dispositivos electrónicos que proporcionan la velocidad y la orientación de un sujeto de captura mediante una combinación de acelerómetros y giroscopios. Algunos de estos IMU se integran en chips de reducido tamaño, como por ejemplo el *NavChip* de *InterSense* [48], que facilita la incorporación de estos sistemas a circuitos electrónicos de mayor complejidad.

Uno de los principales inconvenientes de los sistemas inerciales son las desviaciones de sus medidas. Como se comentó en la sección 3.3.4, una forma de evitar este problema es combinando estos sistemas con otras tecnologías. Por esta razón, la mayoría de los dispositivos comerciales inerciales son híbridos, y se apoyan principalmente en las tecnologías magnética, acústica y óptica.

Híbridos magnéticos

La mayoría de los dispositivos inerciales que se ayudan de la tecnología magnética lo hacen porque incluyen magnetómetros entre sus componentes electrónicos. Los magnetómetros permiten compensar las desviaciones de los acelerómetros y los giroscopios utilizando el campo magnético terrestre como vector de referencia.

Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el *MTi* de *Xsens* [49]. Se trata de un pequeño dispositivo compacto, del tamaño de una caja de cerillas, que se conecta al ordenador mediante un cable USB. Está recomendado para aplicaciones relacionadas con la estabilización y el control de equipos, ya sean cámaras, robots o vehículos. Para aplicaciones en las que es necesaria la medida de segmentos del cuerpo humano (como las relacionadas con la rehabilitación, la medicina deportiva, la biomecánica, la realidad virtual, la ergonomía, etc.), se requiere el uso simultáneo de más de un sensor de este tipo. Para ello, *Xsens* recomienda el uso del *Xbus Kit*, un interfaz digital común al que se pueden conectar hasta veinte *MTx* (figura 3.15a). Estos *MTx* son dispositivos bastante similares al *MTi* pero con menor volumen. Aprovechando las características de estos

sensores, *Xsens* también comercializa el *MVN*, un traje de licra con 17 dispositivos *MTx* que permite la adquisición de movimiento de un sujeto de captura de forma sencilla.

El *InertiaCube3* de *InterSense* [48] es otro dispositivo híbrido magnético con características parecidas al *MTi* de *Xsens*. Sus bibliotecas de software permiten la conexión simultánea de hasta 32 sensores. Además, disponen de una versión inalámbrica, pero sólo permite la conexión de hasta 4 sensores a la misma vez.

Los *Colibri* de *Trivisio* [50] también incorporan sensores de temperatura y son impermeables al agua, mientras que el *MTi-G* de *Xsens* [49] integra, además de los magnetómetros, un barómetro y una antena receptora de GPS que permite que las salidas de datos sean más precisas.

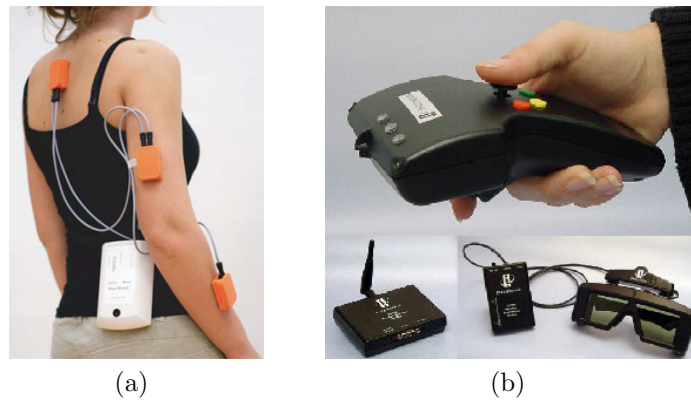


Figura 3.15: Sistemas inerciales. (a) Sistema híbrido inercial–magnético *MTx* de *Xsens*. (b) Sistema híbrido inercial–acústico *IS-900* de *InterSense*. Este dispositivo es del mismo modelo que el que aparece en la figura 2.1a.

Híbridos acústicos

Los dispositivos híbridos inerciales–acústicos emplean transmisores de señales ultrasónicas para compensar las desviaciones de los sensores inerciales. El *IS-900* de *InterSense* [48] (figura 3.15b) es un ejemplo de este tipo de dispositivo. Su hardware se compone de un conjunto de generadores de señales ultrasónicas de 40 kHz que se reciben en los dispositivos de seguimiento, situados en el sujeto de captura. La componente inercial de estos dispositivos de seguimiento calcula la orientación y la posición, mientras que la componente acústica evita la acumulación de desviaciones. El *IS-900* tiene una capacidad de expansión de hasta cuatro dispositivos de seguimiento y puede ser inalámbrico de forma opcional. *InterSense* recomienda su uso en aplicaciones relacionadas con pantallas inmersivas, simulación y entrenamiento, simuladores de cabinas de mando, realidad aumentada, etc.

Otro dispositivo de este estilo es el *IGS-190 Hybrid* de *Animazoo* [47], muy similar

al *IGS-190* comentado anteriormente, pero combinado con un sistema ultrasónico. Permite acomodar hasta cuatro sistemas dentro de un área de 6 m².

También existen dispositivos híbridos acústicos orientados a propósitos más específicos, como el *VCam* de *InterSense* [48], un seguidor de movimiento en forma de cámara de vídeo que permite ver lo que vería una cámara en el interior de un entorno virtual.

Híbridos ópticos

Los sistemas inerciales también se pueden combinar con tecnologías ópticas. El *IS-1200 VisTracker* de *InterSense* [48], por ejemplo, es un dispositivo que se compone de seis sensores inerciales MEMS y una cámara inteligente que le permite conocer la posición de forma continua gracias a unos marcadores pasivos. Debido a que estos marcadores se deben colocar en una superficie que la cámara sea capaz de seguir (por ejemplo en el techo), las aplicaciones a las que este dispositivo está orientado se relacionan principalmente con la realidad aumentada. En la actualidad *InterSense* está trabajando en otro dispositivo híbrido inercial-óptico, el *IS-1200 InertiaHawk*, que permitirá su uso en otras aplicaciones, como pueden ser el seguimiento del movimiento de la cabeza en entornos dinámicos, el control de procesos de manufacturación, el seguimiento de instrumental quirúrgico, estudios sobre la conciencia situacional, etc.

Algunos de los mandos con los que se controlan las videoconsolas más actuales son alternativas reales y económicas a los dispositivos comerciales descritos anteriormente. El *Wii Remote* (figura 3.16a) es el controlador principal de la consola *Wii* de *Nintendo* [51]. Este mando tiene un componente inercial, ya que incorpora el chip *ADXL330* que le proporciona tres acelerómetros [52], y un componente óptico, puesto que también dispone de un sensor de infrarrojos montado en su parte superior que le permite detectar la luz emitida por un dispositivo formado por dos balizas [53].

A partir de septiembre de 2010, se espera que *Sony* lance un nuevo modelo de controlador inercial para su videoconsola *PlayStation 3*, el *PlayStation Move* (figura 3.16b), que también se ayudará de la tecnología óptica basada en vídeo [54]. Éste incluirá, además de acelerómetros y giroscopios en cada uno de sus tres ejes, un marcador activo en forma de esfera luminosa en su extremo superior con el que la consola podrá averiguar cuál es la distancia entre el controlador y una cámara. El dispositivo también dispondrá de un magnetómetro, por lo que también se puede considerar híbrido inercial-magnético.



Figura 3.16: Sistemas inerciales. (a) Controlador *Wii Remote* de la consola *Wii* de *Nintendo*, un sistema híbrido inercial-óptico. (b) Controlador *PlayStation Move* de la consola *PlayStation 3* de *Sony*, un sistema híbrido inercial-óptico-magnético.

3.4.5. Dispositivos acústicos

Aunque los dispositivos acústicos, como se comentó en la sección anterior, se suelen combinar con tecnologías inerciales, también se pueden encontrar algunos dispositivos comerciales enteramente acústicos.

Éste es el caso del *Hx11* de *Hexamite* [55]. Se trata de un dispositivo del tipo *de fuera hacia dentro* (de acuerdo con la clasificación propuesta en la sección 3.2), en el que la posición de uno o más transmisores se puede calcular a una red de receptores situada en el techo. Una de las ventajas de este dispositivo es que la red puede expandirse todo lo que se desee, pudiendo cubrir áreas de cientos de metros cuadrados. Su precio dependerá del área que se pretenda cubrir. Así, un sistema destinado a un área de 20 m² cuesta en torno los 1300 euros; para un área de 100 m² el precio es de unos 2500 euros; y si se desea proporcionar cobertura a una superficie de 10 000 m², el precio supera los 88 000 euros [20].

Por otro lado, también se pueden encontrar dispositivos como el *Head Tracker* de *Logitech* [56], más orientados a aplicaciones relacionadas con la realidad virtual y la simulación. Se trata de un dispositivo *de dentro hacia fuera* que consta de un transmisor y un receptor similar al ratón de un ordenador. Este receptor tiene, además, la forma adecuada para que sea posible su montaje en un casco. Su precio es de unos 2600 euros [20].

3.5. Conclusiones

En la tabla 3.1 se resumen las principales características de las tecnologías empleadas por los dispositivos de adquisición de movimiento. En ella se comparan sus

ventajas, inconvenientes, las aplicaciones hacia las que se orientan y el estado actual de la tecnología.

De acuerdo con el objetivo general de este proyecto, el dispositivo que se tiene que seleccionar debe permitir que el sistema resultante cumpla los criterios de usabilidad y bajo coste. En este contexto, un dispositivo contribuirá a la usabilidad del sistema si tiene en cuenta, entre otros, los siguientes factores: que ofrezca facilidad de uso en la realización de los ejercicios propuestos por los especialistas y resulte intuitivo al paciente o deportista; que permita que cada usuario pueda adaptar el sistema a sus preferencias; que favorezca un aprendizaje rápido y correcto del sistema; y, en el caso de la rehabilitación en el que los pacientes pueden padecer alguna discapacidad, que permita la utilización del sistema independientemente de sus limitaciones [57].

A partir del análisis de los dispositivos comerciales, se comprueba que algunas tecnologías son menos adecuadas que otras para cumplir con los requisitos propuestos. Por ejemplo, ninguno de los dispositivos comerciales con tecnología acústica estudiados anteriormente orienta su uso hacia aplicaciones directamente relacionadas con la rehabilitación o la medicina del deporte, aunque sí con entornos de realidad virtual y simulación. Este hecho, unido a sus inconvenientes (es necesaria una línea de visión directa entre el transmisor y los receptores, sufren interferencias causadas por los ecos y el ruido, etc.) hacen a la tecnología acústica poco apropiada para los objetivos de este proyecto.

Por otro lado, existen tecnologías que pueden entorpecer en gran medida los movimientos del paciente o deportista y que tampoco resultan adecuadas en el contexto de este proyecto, como ocurre con los dispositivos que utilizan la tecnología mecánica. De modo similar, existen otras tecnologías que, debido al despliegue de medios y componentes necesarios para la puesta en marcha de sus dispositivos, serían muy difíciles de configurar y complejos de mantener en entornos domésticos; esto ocurre con las tecnologías ópticas basadas en marcadores, que requieren el uso de varias cámaras dispuestas de un modo muy específico y que el sujeto de captura lleve puesto una serie de marcadores colocados de manera muy específica.

Con el conjunto de dispositivos restante, la selección puede realizarse en base al coste económico. De entre estos dispositivos destaca el controlador de la videoconsola *Wii* de *Nintendo*, conocido como *Wii Remote*. Sus características lo convierten en el dispositivo óptimo para el desarrollo del proyecto. Su reducido coste, de unos 39 euros, es una de las principales ventajas (sobre todo si se tiene en cuenta que el siguiente dispositivo comercial más económico de todos los que se han analizado ya se sitúa en torno a los 1800 euros).

Se trata de un dispositivo inercial, por lo que no requiere transmisores para su fun-

Tecnología	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones	Estado de la tecnología
Óptica (config. de fuera hacia dentro)	<ul style="list-style-type: none"> Alta frecuencia de captura. Alta velocidad de actualización. Gran volumen de captura. Sin limitación por cables. Sin distorsión ante metales. Gran exactitud de los datos. Fácil configuración de marcadores. Captura de varios sujetos a la vez. 	<ul style="list-style-type: none"> Problemas de línea de visión. Diseño cuidadoso del entorno. Gran posprocesamiento de datos. Hardware caro. Efecto de cambio de baliza en dispositivos «de dentro hacia fuera». 	<ul style="list-style-type: none"> Ciencias de la vida: locomoción humana, rehabilitación, fisioterapia, biomecánica, ergonomía, equilibrio, rendimiento deportivo. Animación: desarrollo videojuegos, producción películas. Ingeniería: interacción hombre-máquina, manipulación y visualización simulaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas «de fuera hacia dentro» y «de dentro hacia fuera». 3DOF (sólo posición). Entre 4500 y 60 000 €. Tecnología madura.
Magnética	<ul style="list-style-type: none"> Altas velocidades de actualización. Salida de datos 6DOF en tiempo real. Sensores pequeños y ligeros. Sin problemas de línea de visión. Captura de varios sujetos a la vez. 	<ul style="list-style-type: none"> Distorsión ante metales Reducido volumen de captura. Limitación por cables. Compleja configuración marcadores. Datos contienen ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> Médicas: navegación quirúrgica. En tiempo real: biomecánica y ergonomía, simulación y entrenamiento, realidad virtual, animación 3D. Militares: seguimiento de cabeza. 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas «de dentro hacia fuera». 6DOF de forma nativa. Entre 1500 y 25 000 €. Tecnología muy madura y extendida.
Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> Gran volumen de captura. Portátiles, rápida configuración. Sin problemas de línea de visión. Captura de varios sujetos a la vez. Salida de datos en tiempo real. Sin interferencias electromagnéticas. 	<ul style="list-style-type: none"> Movimientos en parte restringidos. Baja frecuencia de muestreo. Configuración de sensores fija. Hibridación con otras tecnologías. Posibles roturas con el uso. Limitada autonomía (baterías). 	<ul style="list-style-type: none"> Giroscopios: animación, simulación y realidad virtual; ergonomía, locomoción humana, análisis deporte. Fibra óptica: realidad virtual, simulación de accidentes, control de robots, factores humanos, CAD, ergonomía. 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas «de dentro hacia dentro». 3DOF (sólo orientación). Entre 8300 y 22 000 €. Uso poco extendido. Menor comunidad de soporte.
Inercial	<ul style="list-style-type: none"> Sin transmisores, autosuficiente. Dispositivos económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Sufren grandes derivas. Interfaz complejo. Hibridación con otras tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> Ciencia del movimiento: biomecánica, ciencia del deporte, rehabilitación, ergonomía. Aplicaciones industriales. Entrenamiento y simulación. Entretenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas «de dentro hacia dentro». Acelerómetros: 3DOF (posición). Giroscopios: 3DOF (orientación). Entre 40 y 2500 €.
Acústica	<ul style="list-style-type: none"> Sensores pequeños y ligeros. Sin interferencias electromagnéticas. 	<ul style="list-style-type: none"> Problemas de línea de visión. Interferencias ante ecos y ruido. Baja velocidad de actualización. Baja resolución. Condiciones ambientales afectan a la exactitud. 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas de posicionamiento de interiores, guiado y seguimiento de robots. Realidad virtual, simulación. 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas «de fuera hacia dentro» y «de dentro hacia fuera». 3DOF (sólo posición). Entre 2500 y 88 000 €. Tecnología sencilla y extendida.

Tabla 3.1: Tabla comparativa de tecnologías.

cionamiento. Puesto que se ayuda de tecnologías ópticas puede compensar las posibles desviaciones de los acelerómetros que lleva integrados (siempre que se utilicen las balizas de luces infrarrojas). No obstante, este controlador dispone del *Wii MotionPlus*, una extensión del dispositivo que, con un coste de 19 euros, le permite capturar de forma más exacta el movimiento complejo gracias a la incorporación de giroscopios.

Capítulo 4

El Wii Remote y el Wii MotionPlus de Nintendo

4.1. Introducción

El *Wii Remote* (figuras 4.1 y 4.2), conocido informalmente como *Wiimote*, es el dispositivo de entrada principal de la consola *Wii* de *Nintendo*. Emplea la tecnología Bluetooth estándar y dispone de múltiples periféricos que le proporcionan datos, así como un puerto de expansión para complementos exteriores.

Aunque las especificaciones oficiales del mando de la *Wii* no se han publicado, se ha conseguido obtener, mediante ingeniería inversa llevada a cabo de forma colectiva, una parte significativa de la información técnica relacionada con su funcionamiento interno [58, 59].

4.2. Descripción hardware

4.2.1. Comunicación Bluetooth

El *Wii Remote* es un dispositivo inalámbrico que utiliza la tecnología *Bluetooth* para comunicarse con su host. Está diseñado en torno al circuito integrado *BCM2042* de *Broadcom* [60], que integra la pila de protocolos de *Bluetooth* [61] y es compatible con la especificación para dispositivos de interfaz humana (HID). El *Wii Remote* aparece como un dispositivo de entrada estándar en cualquier host *Bluetooth*. Sin embargo, no hace uso ni de los tipos de datos estándar ni del descriptor de HID. Sólo describe el tamaño del informe, dejando el contenido sin definir, lo que lo hace inservible con

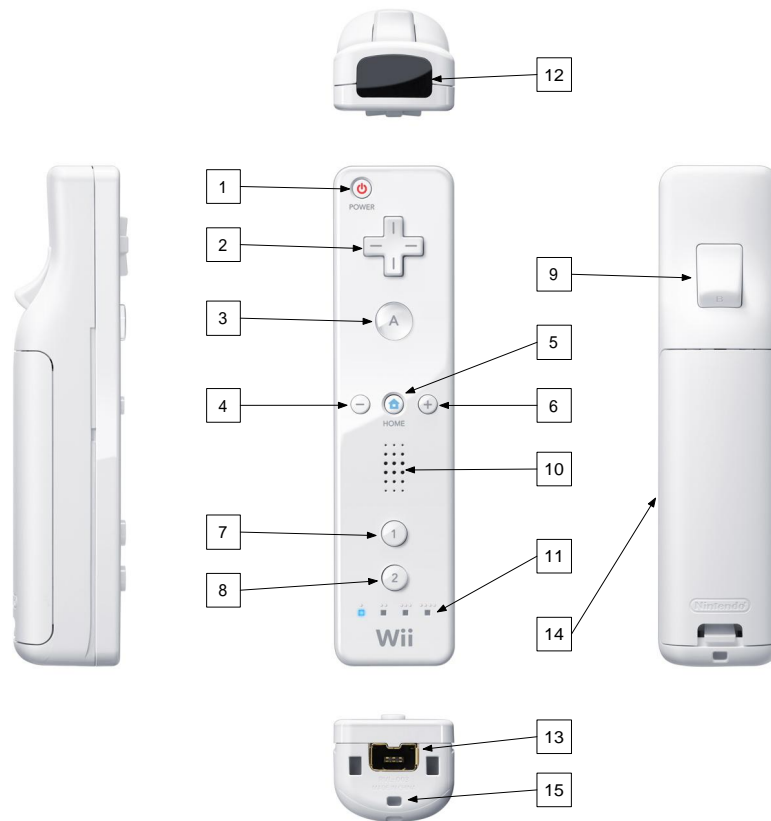


Figura 4.1: Componentes del *Wii Remote*. (1) Botón POWER; (2) cruz de control; (3) botón A; (4) botón -; (5) botón HOME; (6) botón +; (7) botón 1; (8) botón 2; (9) botón B; (10) altavoz; (11) indicadores LED; (12) puntero de cámara infrarroja; (13) conector de la extensión externa; (14) tapa del compartimento de las pilas; (15) enganche de la correa.

controladores de HID estándar. El *Wii Remote* utiliza en realidad un conjunto complejo de operaciones que se transmiten a través de informes de salida, y devuelve diferentes paquetes de datos con información sobre sus componentes a través de sus informes de entrada.

Cuando el protocolo de descubrimiento de servicios (SDP) definido por *Bluetooth* [62] consulta al *Wii Remote*, éste devuelve la información que se muestra en la tabla 4.1.

El *Wii Remote* no parece exigir ninguna de las funciones de autenticación o cifrado del estándar de *Bluetooth*. Con el fin de interactuar con él, primero se debe colocar en modo de detección pulsando los botones 1 y 2 simultáneamente, o presionando el botón rojo de sincronización que se encuentra debajo de la tapa de la batería. Una vez en este modo, el controlador de *Bluetooth* del host puede consultar el *Wii Remote*. Si el controlador del host no se conecta al *Wii Remote* en 20 segundos, el mando se apaga. Si se mantienen pulsados los botones 1 y 2 de forma continua, se forzará a que el *Wii Remote* permanezca en el modo de detección sin apagarse, aunque esto no funciona

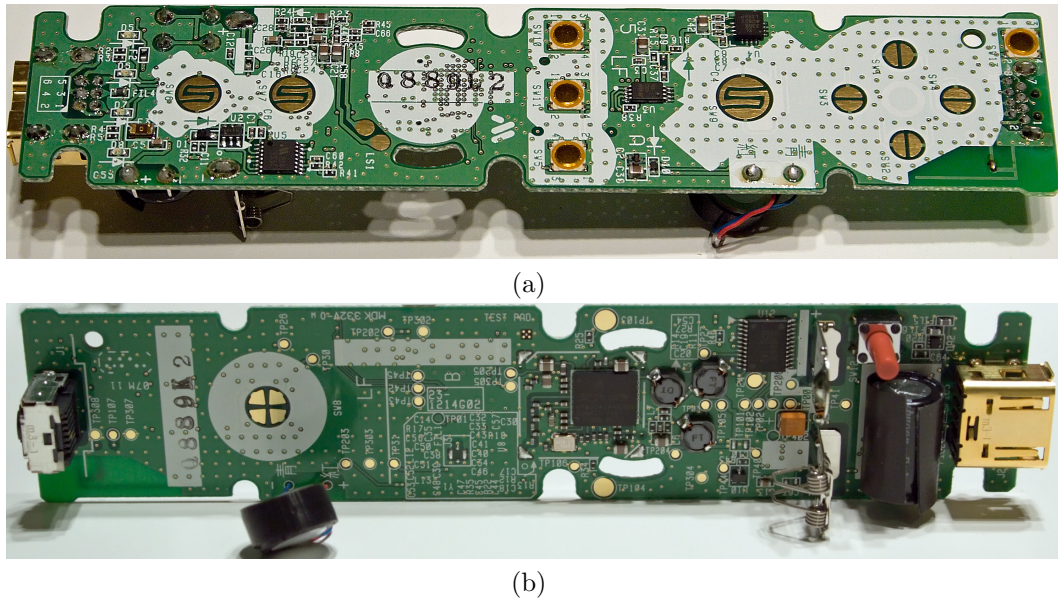


Figura 4.2: Circuito impreso del *Wii Remote*. (a) Superficie superior; (b) superficie inferior.

Nombre	Nintendo RVL-CNT-01
Id. de proveedor	0x057e
Id. de producto	0x0306
Clase de dispositivo principal	1280
Clase de dispositivo secundaria	4
Clase de servicio	0
(Resumen de los valores de clase)	0x002504

Tabla 4.1: Información proporcionada por el *Wii Remote* tras una consulta del protocolo de descubrimiento de servicios de *Bluetooth*.

con el botón de sincronización. Cuando el mando se encuentra en modo de detección, un número de indicadores LED parpadeará basándose en el nivel de la batería.

La sincronización del *Wii Remote* con su host implica un emparejamiento *Bluetooth* estándar. Cuando se presiona el botón de sincronización del mando, éste aceptará peticiones de emparejamiento. El código de seguridad (PIN) necesario es la dirección de *Bluetooth* del host, escrita en binario (6 bytes) y de atrás hacia delante (el último byte primero). La mayoría de las implementaciones actuales de *Bluetooth* no tratan esta característica de forma correcta, ya que suelen considerar el PIN como una cadena ASCII normal terminada en NULL.

Cualesquiera otras medidas que se deban tomar tras la sincronización del *Wii Remote* todavía no se han resuelto mediante ingeniería inversa.

Una vez que el *Wii Remote* se ha sincronizado, cuando se pulsa un botón, intentará localizar activamente el host con el que se ha emparejado y tratará de conectarse

a él, en vez de hacerse al revés.

Interfaz HID

El estándar *Bluetooth* permite que los dispositivos se puedan autodescribir utilizando un bloque descriptor. Este bloque incluye una enumeración de los informes que entiende el dispositivo. Un informe es similar a un puerto de red que se asigna a un servicio particular. Sin embargo, los informes son unidireccionales y los descriptores de HID listan para cada puerto la dirección (de entrada o de salida) y el tamaño de carga de cada puerto. Como cualquier dispositivo *Bluetooth*, el *Wii Remote* informa sobre su bloque descriptor de HID cuando se le pregunta utilizando el protocolo SDP. Sin embargo, no se devuelve ninguna información sobre las propias unidades de datos de cada informe, sólo su longitud en bytes.

Los informes de entrada se envían del *Wii Remote* al host. Los informes de salida se envían del host al *Wii Remote*. Los informes que utiliza el *Wii Remote* y su uso se muestran en la tabla 4.2.

E/S	ID(s)	Tamaño	Función
S	0x10	1	Desconocido
S	0x11	1	LEDs
S	0x12	2	Modo de presentación de datos
S	0x13	1	Activación de la cámara de infrarrojos (1)
S	0x14	1	Activación del altavoz
S	0x15	1	Solicitud del informe de estado
S	0x16	21	Escritura en memoria y registros
S	0x17	6	Lectura de memoria y registros
S	0x18	21	Datos del altavoz
S	0x19	1	Desactivación del altavoz
S	0x1a	1	Activación de la cámara de infrarrojos (2)
E	0x20	6	Informe de estado
E	0x21	21	Lectura de datos de memoria y registros
E	0x22	4	Reconocimiento del informe de salida, resultado de la función de retorno
E	0x30–0x3f	2–21	Presentación de datos

Tabla 4.2: Informes del *Wii Remote*.

Para mayor claridad, el convenio que se utilizará a partir de ahora para representar los paquetes de datos es el siguiente: primero, la instrucción *Bluetooth* entre paréntesis (los informes de salida utilizan el byte 0x52, mientras que los informes de entrada utilizan el byte 0xa1) [63]; y a continuación el identificador de informe y la carga útil, tal y como se describe en los puntos 7.3 y 7.4 de la especificación de *Bluetooth* [61].

Cada byte se escribirá en hexadecimal, sin el prefijo 0x y separados por espacios. Por ejemplo,

```
(a1) 30 00 00
```

es un paquete de entrada de datos (0xa1), en el canal 0x30, con los dos bytes de carga útil 0x00, 0x00.

Información común de los informes de salida. El primer byte de muchos informes de salida tiene un significado similar. En todos los informes de salida, el bit 0 (0x01) del primer byte controla la función de vibración. Además, varios informes de salida utilizan el bit 2 (0x04) como una bandera ON/OFF que controla su función específica. Por ejemplo, el envío de 0x04 al informe 0x19 (desactivación del altavoz) silenciará el altavoz:

```
(52) 19 04
```

Y el envío de (0x00) lo reactivará:

```
(52) 19 00
```

Los informes de salida que comparten el comportamiento descrito anteriormente son: el modo de presentación de datos (0x12), la activación de la cámara de infrarrojos (1) (0x13), la activación del altavoz (0x14), la desactivación del altavoz (0x19) y la activación de la cámara de infrarrojos (2) (0x1a).

Información común de los informes de entrada. Los dos primeros bytes de todos los informes de entrada, excepto el 0x3d, contienen la información relativa a los botones básicos (BB BB). Esto incluye todos los informes de estado 0x2*, no sólo los informes de datos 0x3*. 0x3d es una excepción, ya que sólo devuelve información de la expansión.

4.2.2. Informe de estado

El *Wii Remote* puede informar sobre su estado, que incluye el estado de unas cuantas configuraciones básicas, la situación del controlador de extensión (si está conectado o desconectado), y el nivel de batería.

0x20: Informe de estado

Para solicitar el informe de estado basta con enviar cualquier byte al informe de salida 0x15. El informe de estado también se envía automáticamente cuando se conecta o desconecta un controlador de extensión.

El siguiente envío solicitará el informe de estado (y desactivará la vibración):

```
(52) 15 00
```

Este informe se puede enviar según se necesite (en respuesta a un informe 0x15), o en respuesta a la conexión o desconexión de una expansión (o una sincronización, si es inalámbrica). Si este informe se recibe cuando no se ha solicitado, la aplicación debe enviar un informe 0x12 para cambiar el modo de presentación de datos, o de lo contrario no se recibirán más informes. Su formato es el siguiente:

```
(a1) 20 LF BB BB 00 00 VV
```

BB BB representa los datos de los botones básicos, y VV es el nivel actual de la batería. L es el estado del LED, y F es una máscara de bits que indica si la batería está descargada, si la expansión se encuentra actualmente conectada, etc. (véase la tabla 4.3).

Bit	Máscara	Significado
0	0x01	Pilas casi agotadas
1	0x02	Conectado un controlador de extensión
2	0x04	Activado el altavoz
3	0x08	Activada la cámara de IR
4	0x10	LED 1
5	0x20	LED 2
6	0x40	LED 3
7	0x80	LED 4

Tabla 4.3: Significado de los bits LF en el informe de estado del *Wii Remote*.

0x21: Lectura de datos de memoria y registros

Este informe se envía cuando se realiza una petición de lectura de memoria. Devuelve entre uno y dieciséis bytes de datos a la vez.

```
(a1) 21 BB BB AA AA SE DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD
```

BB BB representa los datos de los botones básicos.

AA AA son los dos bytes menos significativos de la dirección de memoria absoluta del primer byte de los datos devueltos (no se devuelve el byte superior del *offset*, ni tampoco si se trata de un registro o memoria que se está utilizando; por lo tanto, esto se debe conocer desde la petición de lectura).

E, el cuarteto inferior del byte SE, es la bandera de error. Los valores de error conocidos son 0 para ningún error, 7 cuando se intenta leer desde un registro de sólo escritura o de una expansión que no está conectada, y 8 cuando se intenta leer de direcciones de memoria inexistentes.

S, el cuarteto superior del byte SE, es el tamaño en bytes, menos uno, del paquete de datos actual. Éste es 0xf (16 bytes) para todos excepto para el último paquete, que podría ser menor si el número solicitado de bytes no es un múltiplo de 16.

Los bytes DD son los datos, que se rellenan con ceros hasta completar los 16 bytes. Si se solicitan más de 16 bytes, se recibirán varios paquetes, y las direcciones AA AA aumentarán en 16 cada vez.

0x22: Reconocimiento del informe de salida, resultado de la función de retorno

Este informe de entrada se envía al host para informarle de un error relacionado con un informe de salida, o el resultado de la función de ese informe de salida. Sólo se envía bajo ciertas condiciones.

Intentar enviar un informe de salida utilizando el método *WriteFile* de la pila *Bluetooth* de *Microsoft* produce un error para todos los informes de salida, excepto para el informe 0x16 (escritura en memoria y registros). El informe 0x16 notifica que ha habido éxito al utilizar el método *WriteFile*. Eso se podría deber a que el informe 0x16 tiene 22 bytes de longitud (a diferencia de otros informes), o a que se trata de un comportamiento especial del informe 0x16. Su formato es el siguiente:

(a1) 22 BB BB EE RR

BB BB representa los datos de los botones básicos.

RR es el número de informe de salida que el *Wii Remote* reconoce haber recibido.

EE es el código de error o el resultado de la función. Los siguientes son algunos de los valores que puede adoptar: 00: éxito; 03: error, como el que ocurre cuando se usa *WriteFile* en la pila *Bluetooth* de *Microsoft*; 04: desconocido (probablemente devuelto por los informes 0x16, 0x17 o 0x18); 05: desconocido (probablemente devuelto por el informe 0x12); 08: desconocido (probablemente devuelto por el informe 0x16).

4.2.3. Presentación de datos

El *Wii Remote* tiene varios modos de presentar los datos. Cada uno de estos modos combina cierta información de los datos básicos con información de los datos de periféricos externos, y los envía al host a través de uno de los identificadores de informe. Los propios periféricos son los que determinan el formato de los datos; todo lo que hace el *Wii Remote* es extraer bytes de ellos y enviarlos al host. Debido a esto, ciertas combinaciones de características no están disponibles, ya que no hay suficientes bytes para ellos en ninguno de los modos de salida.

El modo de presentación de datos se establece mediante el envío de una instrucción de dos bytes al informe 0x12:

```
(52) 12 TT MM
```

El bit 2 de TT especifica si se desea información continua. Si el bit 2 (0x04) está activado, el *Wii Remote* enviará informes indicando si ha habido algún cambio en los datos o no. De lo contrario, el *Wii Remote* sólo enviará un informe de salida cuando los datos hayan cambiado.

MM especifica el modo en que se presentan los datos. Cada modo se especifica identificando el informe de salida al que se enviarán los datos. Por ejemplo, esto configurará el modo a 0x33:

```
(52) 12 00 33
```

A partir de este momento, los datos llegarán a través del informe de entrada 0x33.

Cuando se enciende el *Wii Remote*, el modo de presentación de datos es el 0x30 por defecto. Tras un evento de conexión o desconexión en el puerto de expansión, la presentación de datos se desactiva, y el modo de presentación de datos se debe restablecer antes de que puedan llegar nuevos datos.

Los modos en los que se incluyen datos del acelerómetro integran una parte de éstos en los bits que no se utilizan de los botones. En todos los modos excepto en 0x3e/0x3f, los datos de los botones incluyen los bits menos significativos (LSB) de los datos del acelerómetro. En el modo 0x3e/0x3f, los datos de los botones permiten incluir los datos del acelerómetro en su eje Z.

0x30: Botones básicos

Este modo devuelve los datos de los botones del *Wii Remote*:

```
(a1) 30 BB BB
```

BB BB representa los datos de los botones básicos.

0x31: Botones básicos y acelerómetro

Este modo devuelve los datos de los botones y el acelerómetro del *Wii Remote*:

```
(a1) 31 BB BB AA AA AA
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. AA AA AA son los datos del acelerómetro.

0x32: Botones básicos con 8 bytes de extensión

Este modo devuelve los datos de los botones del *Wii Remote* y los datos de un controlador de extensión conectado a él:

```
(a1) 32 BB BB EE EE EE EE EE EE EE EE
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. Los ocho bytes EE son del controlador de extensión conectado al *Wii Remote*.

0x33: Botones básicos y acelerómetro con 12 bytes IR

Este modo devuelve los datos de los botones, el acelerómetro y la cámara de infrarrojos del *Wii Remote*:

```
(a1) 33 BB BB AA AA AA II II II II II II II II II II II II
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. AA AA AA son los datos del acelerómetro. Los doce bytes II son de la cámara de infrarrojos integrada.

0x34: Botones básicos y 19 bytes de extensión

Este modo devuelve los datos de los botones del *Wii Remote* y los datos de un controlador de extensión conectado a él:

```
(a1) 34 BB BB EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. Los diecinueve bytes EE son del controlador de extensión conectado al *Wii Remote*.

0x35: Botones básicos y acelerómetro con 16 bytes de extensión

Este modo devuelve los datos de los botones y el acelerómetro del *Wii Remote* y los datos de un controlador de extensión conectado a él:

```
(a1) 35 BB BB AA AA AA EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. AA AA AA son los datos del acelerómetro. Los dieciséis bytes EE son del controlador de extensión conectado al *Wii Remote*.

0x36: Botones básicos con 10 bytes de IR y 9 bytes de extensión

Este modo devuelve los datos de los botones y la cámara de infrarrojos del *Wii Remote* y los datos de un controlador de extensión conectado a él:

```
(a1) 36 BB BB II II II II II II II II II EE EE EE EE EE EE EE EE EE
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. AA AA AA son los datos del acelerómetro. Los diez bytes II son de la cámara de infrarrojos integrada y los nueve bytes EE son del controlador de extensión conectado al *Wii Remote*.

0x37: Botones básicos y acelerómetro con 10 bytes de IR y 6 bytes de extensión

Este modo devuelve los datos de los botones, el acelerómetro y la cámara de infrarrojos del *Wii Remote* y los datos de un controlador de extensión conectado a él:

```
(a1) 37 BB BB AA AA AA II II II II II II II II II EE EE EE EE EE EE
```

BB BB representa los datos de los botones básicos. AA AA AA son los datos del acelerómetro. Los diez bytes II son de la cámara de infrarrojos integrada y los seis bytes EE son del controlador de extensión conectado al *Wii Remote*.

0x3d: 21 bytes de extensión

Este modo devuelve los datos de un controlador de extensión conectado al *Wii Remote*. Éste es el único informe de entrada que no incluye los botones básicos:


```
(a1) 3d EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE EE
```

Los veintiún bytes EE son del controlador de extensión conectado al *Wii Remote*.

0x3e/0x3f: Botones básicos y acelerómetro con 36 bytes IR intercalados

Tanto 0x3e como 0x3f son equivalentes, y devuelven los datos de forma alterna a través de los identificadores de informe 0x3e y 0x3f. Los datos se intercalan y se devuelven a la mitad de la velocidad de los otros modos, ya que se necesitan dos informes para una sola unidad de datos. Este modo devuelve los datos de los botones, el acelerómetro y la cámara de infrarrojos del *Wii Remote*:

```
(a1) 3e BB BB AA II II II II II II II II II II II II II II II II II II II
(a1) 3f BB BB AA II II II II II II II II II II II II II II II II II II II
```

BB BB representa los datos de los botones básicos, como se especifican en la sección 4.2.5. AA AA AA son los datos del acelerómetro, en un formato específico de este modo descrito en la sección 4.2.5. Los treinta y seis bytes II corresponden a la cámara de infrarrojos integrada.

4.2.4. Memoria y registros

El *Wii Remote* incluye una memoria EEPROM integrada, siendo una parte de ella accesible al usuario. Esta parte de la memoria se utiliza para almacenar, entre otros datos, las constantes de calibración. Además, muchos periféricos del *Wii Remote* disponen de registros que son accesibles a través de una porción del espacio de direcciones. Para acceder a la memoria integrada y a los registros periféricos se utilizan los mismos informes, utilizando una bandera para seleccionar entre los dos.

Lectura y escritura

Para leer los datos, las instrucciones se envían al informe de salida 0x17:

```
(52) 17 MM FF FF FF SS SS
```

FF FF FF es el *offset*, y SS SS es el tamaño en bytes que hay que leer (los dos en formato *big-endian*, esto es, el byte más significativo primero). El bit 2 (0x04) de MM selecciona el espacio de direcciones. Al desactivar este bit se lee de la memoria EEPROM, mientras que al activarlo se lee de los registros de control. Activar el bit 3 (0x08) también sirve

para los registros de acceso, pero activar los dos produce errores. Al igual que con todos los demás informes, éste también incluye una bandera de vibración que se debe mantener en el estado previo para que no afecte.

Los datos leídos se devuelven a través del informe de entrada `0x21`:

```
(a1) 21 BB BB SE FF FF DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD
```

`BB BB` es el estado de los botones del *Wii Remote*. Durante la lectura de datos, la presentación normal de los informes de entrada se encuentra temporalmente suspendida. Los datos de los botones están disponibles a través de los informes de entrada de datos, pero no se puede acceder a ningún otro dato de entrada mientras dure la transferencia.

`FF FF` es el *offset* de la memoria del *Wii Remote* para el primer byte de datos devueltos (como se explicó en la sección 4.2.2, no se devuelve el byte superior del desplazamiento, como tampoco la memoria de datos que se está utilizando; por lo tanto, esto ya se debe conocer en la petición de lectura).

`E` (el cuarteto inferior de `SE`) es la bandera de error. Los valores de error conocidos son 0 para ningún error, 7 al intentar leer desde un registro de sólo escritura, y 8 al intentar leer de memoria inexistente.

`S` (el cuarteto superior de `SE`) es el tamaño en bytes, menos uno, del paquete de datos actual. Éste es de `0xf` (16 bytes) excepto para el último paquete, que podría ser menor si el número de bytes solicitado no es un múltiplo de 16.

Los bytes `DD` son los datos, rellenos con ceros hasta completar 16 bytes. Si se solicitan más de 16 bytes, se recibirán varios paquetes, con `FF FF` desplazamientos que aumentan en 16 cada vez.

Para escribir los datos, las instrucciones se envían al informe de salida `0x16`:

```
(52) 16 MM FF FF FF SS DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD
```

El significado de los bytes es el mismo que el de las lecturas.

A través del informe de entrada `0x22` se recibe algún tipo de reconocimiento; sin embargo esto todavía no se ha resuelto mediante ingeniería inversa.

Memoria EEPROM

El *Wii Remote* contiene un chip EEPROM [64] (figura 4.3) de 128 kbit (equivalente a 16kB). Parte de sus contenidos incluye código para el microcontrolador integrado, y una sección genérica en la que el host puede leer y escribir libremente. Esta sección

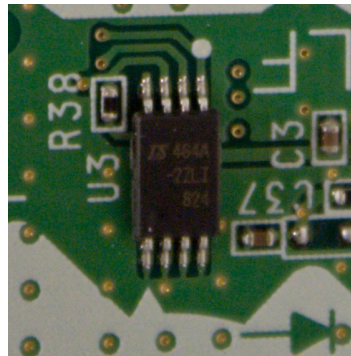


Figura 4.3: Circuito integrado de la memoria EEPROM del *Wii Remote*.

tiene un tamaño de $0x1700$ bytes de longitud, y parte de esta memoria se utiliza para almacenar datos de los juegos de *Nintendo Wii*. Se puede acceder mediante la lectura/escritura en las direcciones $0x0000$ – $0x16FF$ del espacio de memoria virtual del *Wii Remote*; en el chip EEPROM real, los datos se encuentran en $0x0070$ – $0x176F$.

El microcontrolador BCM2042 [60] integrado en el *Wii Remote* incluye una amplia sección ROM en el chip de 108kb para almacenar el firmware. Si el chip EEPROM contiene código para el BCM2042, es probable que se hiciera para que se pudieran llevar a cabo las actualizaciones de firmware, por lo que también podría existir una forma de acceder a las otras partes de la EEPROM a través de *Bluetooth*.

En un *Wii Remote* virgen, adquirido por separado (no incluido con una *Nintendo Wii*) y que nunca se ha comunicado con ningún dispositivo (excepto el ordenador utilizado para volcar el contenido de la memoria), la mayor parte de la memoria está en blanco ($0x00$). Sin embargo, los primeros bytes contienen algo de información:

0000:	a1 aa 8b 99 ae 9e 78 30 a7 74 d3 a1 aa 8b 99 ae
0010:	9e 78 30 a7 74 d3 82 82 82 15 9c 9c 9e 38 40 3e
0020:	82 82 82 15 9c 9c 9e 38 40 3e 00 00 00 00 00 00
0030:	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

que se puede visualizar mejor como dos secuencias, cada una repetida dos veces:

0000:	a1 aa 8b 99 ae 9e 78 30 a7 74 d3
000b:	a1 aa 8b 99 ae 9e 78 30 a7 74 d3
0016:	82 82 82 15 9c 9c 9e 38 40 3e
0020:	82 82 82 15 9c 9c 9e 38 40 3e

Todavía no está claro por qué se repiten estas secuencias; pero puesto que al menos

la segunda se conoce por ser datos de calibración, es probable que una versión contenga los datos de calibración que se están utilizando realmente, mientras que la otra versión sea para fines de copia de seguridad (por ejemplo, para una opción de «vuelta a los ajustes de fábrica») en caso de que haya una manera de recalibrar el *Wii Remote* con futuras actualizaciones del firmware de *Nintendo Wii*.

Los cuatro bytes que empiezan en 0x0016 y 0x0020 almacenan los desplazamientos cero calibrados para el acelerómetro (los 8 bits superiores de X, Y, Z en los tres primeros bytes, y los 2 bits inferiores contenidos en el cuarto byte como -XXYYZZ). Es probable que los cuatro bytes en 0x001a y 0x0024 guardan la fuerza de la gravedad sobre esos ejes. La función de los otros bytes de datos no se conoce, y muchos de ellos difieren entre los *Wii Remote*. La *Nintendo Wii* podría no utilizar alguno (o ninguno) de estos bytes [59].

Sin embargo, se ha documentado el caso de un *Wii Remote* en el que se había perdido la funcionalidad de la extensión tras un cambio de pilas, y la restauración de estos bytes solucionó el problema. Se aconseja que nunca se sobrescriban estos bytes, y se recomienda que se les haga una copia de seguridad, ya que es probable que el propio *Wii Remote* utilice algunos de ellos [59].

En 0x16d0, hay algunos datos desconocidos más:

16d0:	00 00 00 ff 11 ee 00 00 33 cc 44 bb 00 00 66 99
16e0:	77 88 00 00 2b 01 e8 13 00 00 00 00 00 00 00
16f0:	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

En contraste con los datos en 0x0000, estos datos parecen diferir sólo en unos pocos bytes entre diferentes *Wii Remote*.

Los rangos de memoria conocidos se listan en la tabla 4.4. El byte superior de la dirección no se utiliza, lo que significa que la memoria se replica cada 0x10000 bytes. La lectura de direcciones no utilizadas en las que los 16 bits inferiores son 0x1700 o superior dará lugar a errores.

Inicio	Fin	Tamaño	Uso
0x0000	0x0029	0x002a	Valores de calibración/Datos preestablecidos
0x002a	0x0fc9	0x0fa0	Datos de usuario/Usos desconocidos
0x0fca	0x12b9	0x02f0	Bloque de datos para juegos de <i>Nintendo Wii</i> (1)
0x12ba	0x15a9	0x02f0	Bloque de datos para juegos de <i>Nintendo Wii</i> (2)
0x15aa	0x16cf	0x0126	Desconocido/Sin usar
0x16d0	0x16ff	0x0030	Datos desconocidos

Tabla 4.4: Rangos de memoria conocidos del *Wii Remote*.

Registros de control

El *Wii Remote* tiene varios espacios de registro asignados a memoria que se corresponden con diferentes periféricos, entre los que se encuentran el altavoz, los controladores de extensión, y la cámara de infrarrojos.

El periférico de acceso se selecciona mediante el primer byte de la dirección, y los 16 bits inferiores especifican el registro para el acceso dentro de ese periférico. El bit más bajo del byte superior se ignora, lo que significa que todos los periféricos se replican en su dirección más `0x10000`. Los periféricos conocidos se muestran en la tabla 4.5.

Inicio	Fin	Uso
0xa20000	0xa20009	Configuración del altavoz
0xa40000	0xa400ff	Configuración del controlador de extensión y datos
0xa60000	0xa600ff	Configuración del Wii Motion Plus y datos
0xb00000	0xb00033	Configuración de la cámara de IR

Tabla 4.5: Lista de periféricos conocidos del *Wii Remote*.

La mayoría de ellos también se replica a través de los bits superiores del periférico individual. Por ejemplo, el segundo byte de la dirección se omite en la dirección del controlador de extensión, lo que significa que cualquier dirección de la forma `0xA4**00` funcionará (al igual que `0xA5**00`).

4.2.5. Características de entrada

Botones

El *Wii Remote* cuenta con 11 botones en su parte frontal, y un botón a modo de gatillo en la parte trasera. De éstos, el botón de encendido es especial y el *Wii Remote* lo trata de forma diferente. Al resto de botones se puede acceder de forma independiente a través de una máscara de dos bytes que se transmite primero en la mayoría de los informes de entrada. Un botón informará con un bit 1 si está apretado, o 0 si no lo está. Por defecto, éstos sólo se envían cuando cambia el estado de cualquier botón, en el modo de notificación de datos `0x30`. Sin embargo, el *Wii Remote* se puede configurar para que informe continuamente sobre el estado de los botones (véase la sección 4.2.3).

Botones básicos. El *Wii Remote* cuenta con 11 botones que se utilizan como dispositivos de entrada regular: A, B (gatillo), una cruceta de cuatro direcciones, +, -, Home, 1 y 2 (véase la figura 4.1). Su estado se informa como bits en una máscara dos bytes. En la tabla 4.6 se muestra cómo se distribuyen estos bits, en orden *big-endian*.

Bit	Máscara	Primer byte	Segundo byte
0	0x01	←	2
1	0x02	→	1
2	0x04	↓	B
3	0x08	↑	A
4	0x10	+	-
5	0x20	Otros usos	Otros usos
6	0x40	Otros usos	Otros usos
7	0x80	Desconocido	Home

Tabla 4.6: Distribución de los bits entre los botones básicos del *Wii Remote*.

Botón de encendido. Si el *Wii Remote* está apagado y se pulsa el botón de encendido, se intentará despertar la *Nintendo Wii* que esté sincronizado con él. El mecanismo para hacer esto se desconoce, y se maneja por completo dentro del módulo *Bluetooth* de la *Nintendo Wii*. Cuando el *Wii Remote* se enciende y se conecta a un host, mantener pulsado el botón de encendido durante unos segundos apagará el *Wii Remote* y solicitará la desconexión del host.

Botón de sincronización. El botón de sincronización se oculta bajo la cubierta de la batería. Cuando se presiona el botón de sincronización, el *Wii Remote* se desconectará de donde esté conectado, pasará al modo visible y aceptará emparejamientos o solicitudes de conexión durante exactamente 20 segundos (independientemente del tiempo que se mantenga pulsado el botón). El modo en el que se realiza la conexión *Bluetooth* se explicó en la sección 4.2.1.

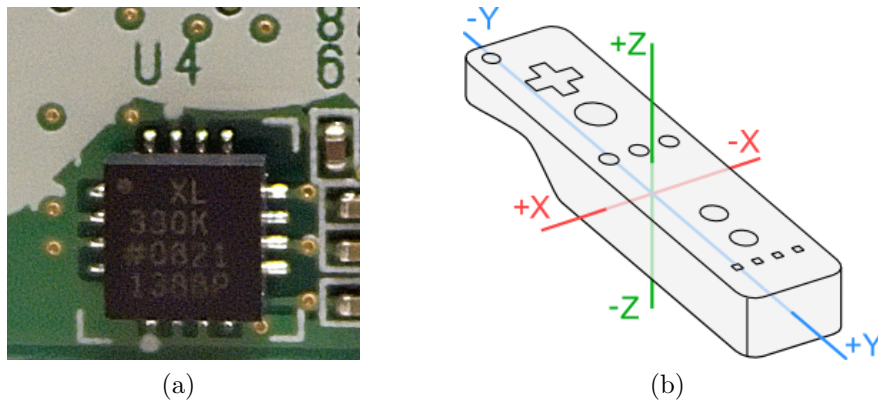
Hardware de los botones. El hardware de los botones varía: hay interruptores de membrana y microinterruptores. La tabla 4.7 describe el hardware de cada entrada.

Acelerómetro

El *Wii Remote* incluye un acelerómetro lineal de tres ejes localizado en la superficie superior del circuito impreso, a la izquierda del botón A (véase la figura 4.2). El circuito integrado es el *ADXL330*, fabricado por *Analog Devices* (figura 4.4a) [52]. El dispositivo está físicamente calculado para que mida aceleraciones en un rango de, al menos, ± 3 G con un 10% de sensibilidad.

Puesto que el acelerómetro realmente mide la fuerza ejercida por un conjunto de pequeñas masas de prueba en su interior con respecto a su caja de protección, está midiendo la aceleración lineal en un marco de referencia de caída libre. Si el *Wii Remote* estuviera en caída libre, proporcionaría un valor de la aceleración nulo. En reposo,

Función	Tipo de interruptor	Superficie circuito impreso (fig. 4.2)
A	membrana	superior, SW9
B	membrana	inferior, SW8
–	microinterruptor	superior, SW10
HOME	microinterruptor	superior, SW11
+	microinterruptor	superior, SW5
1	membrana	superior, SW7
2	membrana	superior, SW6
↑	membrana	superior, SW4
↓	membrana	superior, SW3
←	membrana	superior, SW1
→	membrana	superior, SW2
POWER	microinterruptor	superior, SW13
Sincron.	microinterruptor	inferior, SW12

Tabla 4.7: Hardware de los botones del *Wii Remote*.Figura 4.4: Acelerómetro del *Wii Remote*. (a) Circuito integrado *ADXL330* en un *Wii Remote*; (b) sistema coordinado empleado por el *Wii Remote*.

presentará una aceleración (+Z, cuando el mando se encuentra horizontal) igual a la aceleración debido a la gravedad (aproximadamente de $9,8 \text{ m/s}^2$) pero en dirección opuesta. Este hecho se puede utilizar para obtener la inclinación a partir de las salidas de la aceleración cuando el *Wii Remote* está razonablemente quieto.

Informes de datos normales del acelerómetro. En todos los modos de notificación de datos que incluyen datos del acelerómetro (a excepción del modo `0x3e/0x3f`), los datos del acelerómetro se informan como tres bytes consecutivos:

```
(a1) RR BB BB XX YY ZZ [...]
```

XX, YY y ZZ son bytes sin signo que representan la aceleración en cada uno de los tres ejes, donde la aceleración cero es de aproximadamente 0x80 (128 unidades). En el diagrama de la figura 4.4b se muestra el sistema de coordenadas. Además, los bytes de los botones BB BB también incluyen los bits menos significativos de los valores de la aceleración en los bits no utilizados, de acuerdo con la tabla 4.8.

	Bit								
Byte	7	6	5	4	3	2	1	0	
0		X⟨1 : 0⟩							
1		Z⟨1⟩	Y⟨1⟩						

Tabla 4.8: Bits de los valores de la aceleración en los informes de datos normales.

Nótese que el valor del acelerómetro en el eje X tiene 10 bits de precisión, mientras que en los ejes Y y Z sólo tienen 9. Por razones de coherencia, se asume que todos tienen un rango de 10 bits y que el bit menos significativo es fijo y de valor 0 para los ejes Y y Z.

Informes de datos intercalados del acelerómetro. En el modo de notificación de datos 0x3e/0x3f, los datos del acelerómetro se reparten en dos informes:

(a1) 3e BB BB XX [...]
(a1) 3f BB BB YY [...]

En este modo, los bits menos significativos no están disponibles. En cambio, la aceleración en X e Y se obtiene como un único byte, y el valor de Z se codifica en los bits no utilizados de los datos de los botones BB BB de la manera explicada en la tabla 4.9.

		Bit							
ID de informe	Byte	7	6	5	4	3	2	1	0
0x3e	0		Z⟨5 : 4⟩						
0x3e	1		Z⟨7 : 6⟩						
0x3f	0		Z⟨1 : 0⟩						
0x3f	1		Z⟨3 : 2⟩						

Tabla 4.9: Bits de los valores de la aceleración en los informes de datos intercalados.

Cámara infrarroja

El *Wii Remote* incluye una cámara monocroma de 128×96 con procesamiento de imágenes integrado. La cámara mira a través de un filtro pasa-infrarrojos que se

encuentra en la carcasa de plástico del mando. El procesamiento de imágenes integrado en la cámara es capaz de realizar el seguimiento de hasta cuatro objetos en movimiento, y éstos son los únicos datos que el host puede obtener. El host no puede disponer de los datos de los píxeles en bruto, por lo que la cámara no se puede utilizar para tomar imágenes de forma convencional. El procesador integrado realiza un análisis subpíxel de ocho aumentos para proporcionar una resolución de 1024×768 en los puntos obtenidos. La *Sensor Bar* que viene con la *Nintendo Wii* incluye dos grupos de diodos LED de infrarrojos en cada extremo, a los que el *Wii Remote* realiza un seguimiento para proporcionar la información de apuntamiento. La distancia entre los centros de los grupos de diodos LED es de 20 cm.

La cámara de infrarrojos se habilita activando el bit 2 de los informes de salida 0x13 y 0x1a:

```
(52) 13 04
(52) 1a 04
```

Características. La cámara está montada en la superficie inferior del circuito (figura 4.5). La cámara de infrarrojos tiene un campo de visión efectivo de unos 33 grados en horizontal y 23 grados en vertical. Con el filtro pasa-infrarrojos intacto, las fuentes de luz de 940 nm se detectan con aproximadamente el doble de intensidad que las fuentes de 850 nm, pero no tienen tan buena resolución a corta distancia. Si se quita el filtro, la cámara puede realizar el seguimiento de cualquier objeto brillante.

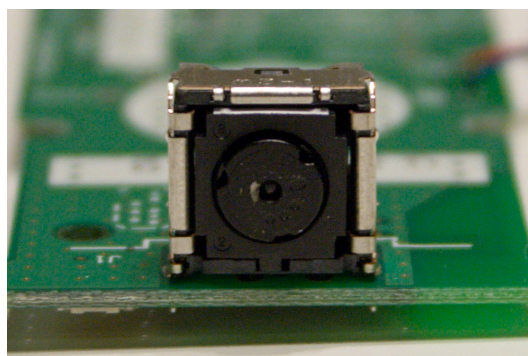


Figura 4.5: Cámara del *Wii Remote*.

Inicialización. Se debe poner a 1 el bit 2 (0x04) del primer byte de los informes de salida para escribir en los registros.

Para encender la cámara de infrarrojos se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Activar la cámara de IR (enviar 0x04 al informe de salida 0x13).
2. Activar la cámara de IR 2 (enviar 0x04 al informe de salida 0x1a).
3. Escribir 0x08 en el registro 0xb00030.
4. Escribir el bloque de sensibilidad 1 en los registros en 0xb00000.
5. Escribir el bloque de sensibilidad 2 en los registros en 0xb0001a.
6. Escribir el número de modo en el registro 0xb00033.
7. Escribir 0x08 en el registro 0xb00030 (de nuevo).

Después de estos pasos, el *Wii Remote* estará en uno de los siguientes estados: la cámara de infrarrojos encendida pero sin obtener datos, la cámara de infrarrojos encendida y obteniendo datos a media sensibilidad, la cámara de infrarrojos encendida y tomando datos a máxima sensibilidad. El estado al que se llega parece ser más o menos aleatorio. Se deben repetir los pasos hasta que el *Wii Remote* se encuentre en el estado deseado. Para evitar el estado aleatorio se debe poner un retraso de al menos 50 ms entre cada byte transmitido.

Configuración de sensibilidad. La sensibilidad se controla mediante dos bloques de configuración, con tamaños de 9 y 2 bytes, respectivamente. Las configuraciones que funcionan se señalan en la tabla 4.10:

Bloque 1	Bloque 2	Notas
00 00 00 00 00 00 90 00 c0	40 00	
02 00 00 71 01 00 aa 00 64	63 03	
00 00 00 00 00 00 90 00 41	40 00	Máxima sensibilidad
02 00 00 71 01 00 64 00 fe	fd 05	Nivel 1
02 00 00 71 01 00 96 00 b4	b3 04	Nivel 2
02 00 00 71 01 00 aa 00 64	63 03	Nivel 3
02 00 00 71 01 00 c8 00 36	35 03	Nivel 4
07 00 00 71 01 00 72 00 20	1f 03	Nivel 5

Tabla 4.10: Configuraciones de sensibilidad de la cámara del *Wii Remote*.

El último byte de ambos bloques determina la sensibilidad de la intensidad, donde a mayores valores menor sensibilidad se obtiene. El *Wii Remote* devolverá los datos de los objetos más tenues posibles cuando el último byte del bloque 1 sea 0x41, y el segundo byte del bloque 2 sea 0x00. El ajuste de la sensibilidad lo más alto posible permite realizar el seguimiento sin luz no deseada, y se recomienda para lograr la mayor

resolución subpíxel. A medida que la sensibilidad se reduce, la resolución subpíxel también se reduce, acercándose a la resolución del sensor de 128×96 .

Formato de los datos. La cámara de infrarrojos puede devolver diferentes conjuntos de datos que describen los objetos a los que está realizando el seguimiento. Cuando la cámara de infrarrojos identifica un objeto, lo asigna a la primera ranura de objetos disponible. Si un objeto se desplaza fuera del campo de visión, su ranura se marca como vacía (devuelve el dato `0xFF`), pero otros objetos conservan sus ranuras. Por ejemplo, si la cámara está realizando el seguimiento de dos objetos y el primero se sale del campo de visión, los datos devueltos serán [vacío, segundo objeto, vacío, vacío]. Con más de cuatro objetos visibles, la cámara tiende a intercambiar rápidamente entre algunos de ellos. Esto podría permitir la percepción de más de cuatro objetos, con una velocidad de respuesta y fiabilidad reducidas.

Modo	Número de modo
Básico	1
Extendido	3
Completo	5

Tabla 4.11: Modo y su número de la cámara de IR.

El formato de los datos debe coincidir con el número de bytes disponibles en el modo de presentación de informes seleccionado. Incluso la elección de un modo con espacio para más bytes de lo necesario no funcionará, tiene que haber una coincidencia exacta.

Modo básico. En el modo básico, la cámara de infrarrojos devuelve 10 bytes de datos correspondientes a las posiciones X e Y de cada uno de los cuatro puntos. Cada posición se codifica con 10 bits, y tienen unos rangos de 0–1023 para la dimensión X, y de 0–767 para la dimensión Y. Cada pareja de puntos se guarda en 5 bytes, y dos de ellos se transmiten para un total de 4 puntos y 10 bytes. El formato de datos para una pareja de objetos se muestra en la tabla 4.12.

Modo extendido. En el modo extendido, la cámara de infrarrojos devuelve los mismos datos que en el modo básico, además de un valor de tamaño aproximado para cada objeto. Los datos se devuelven en 12 bytes, tres bytes por objeto. El tamaño tiene un rango de 0–15. El formato de datos para cada objeto se muestra en la tabla 4.13.

	Bit							
Byte	7	6	5	4	3	2	1	0
0	X1⟨7 : 0⟩							
1	Y1⟨7 : 0⟩							
2	Y1⟨9 : 8⟩	X1⟨9 : 8⟩	Y2⟨9 : 8⟩	X2⟨9 : 8⟩				
3	X2⟨7 : 0⟩							
4	Y2⟨7 : 0⟩							

Tabla 4.12: Formato de datos del modo básico de la cámara de IR.

	Bit							
Byte	7	6	5	4	3	2	1	0
0	X⟨7 : 0⟩							
1	Y⟨7 : 0⟩							
2	Y⟨9 : 8⟩	X⟨9 : 8⟩	S⟨3 : 0⟩					

Tabla 4.13: Formato de datos del modo extendido de la cámara de IR.

Modo completo. En el modo completo, la cámara de infrarrojos devuelve aún más datos, 9 bytes por objeto, que hacen un total de 36 bytes para los cuatro. Los datos se dividen entre dos informes de entrada de 18 bytes cada uno (véase el modo de informe de datos 0x3e/0x3f). Los tres primeros bytes de cada objeto son los mismos que en el modo extendido, y están seguidos por la caja de delimitación de píxeles incluida en la colección de datos junto con un valor de intensidad más profunda. El formato de datos de cada objeto se muestra en la tabla 4.14.

	Bit							
Byte	7	6	5	4	3	2	1	0
0	X⟨7 : 0⟩							
1	Y⟨7 : 0⟩							
2	Y⟨9 : 8⟩	X⟨9 : 8⟩	S⟨3 : 0⟩					
3	0	X mín⟨6 : 0⟩						
4	0	Y mín⟨6 : 0⟩						
5	0	X máx⟨6 : 0⟩						
6	0	Y máx⟨6 : 0⟩						
7	0							
8	Intensidad⟨7 : 0⟩							

Tabla 4.14: Formato de datos del modo completo de la cámara de IR.

4.2.6. Características de salida

El *Wii Remote* cuenta con tres características de salida: diodos LED, vibración y el altavoz.

Diodos emisores de luz

Hay cuatro diodos LED azules en la parte frontal del *Wii Remote*. Durante el modo de detección y antes de la inicialización, estos diodos parpadean a una tasa fija. El número de diodos que parpadean es proporcional a la tensión de la batería, lo que indica la carga de las pilas (los cuatro se iluminan si las pilas están cargadas, y sólo se ilumina la primera si las pilas están bajas y deben reemplazarse).

Los diodos LED son controlables de manera independiente por el host, y se puedan configurar para mostrar cualquier patrón. También se pueden modular a una velocidad relativamente alta, lo que permite un cierto control del brillo a costa de un gran ancho de banda de *Bluetooth*. La modulación sigma-delta funciona razonablemente bien para esto.

Los diodos LED se pueden controlar mediante el envío de un informe con identificación 0x11:

```
(52) 11 LL
```

El cuarteto superior de LL controla los cuatro diodos. El bit 4 de LL controla el primer LED, y el bit 7 controla el último:

Bit	Máscara	Diodos LED
4	0x10	■ □ □ □
5	0x20	□ ■ □ □
6	0x40	□ □ ■ □
7	0x80	□ □ □ ■

Tabla 4.15: Bits de control de los diodos LED.

Se recomienda no apagar todos los diodos LED durante un largo periodo de tiempo cuando se programe el mando, ya que podría conducir al usuario a creer que el *Wii Remote* está desconectado cuando en realidad está activo.

Desde el punto de vista del circuito electrónico, los diodos LED son piezas montadas en la superficie, y se activan a 2,66 V en CC.

Motor de vibración

El *Wii Remote* incluye una función de vibración, que se implementa como un pequeño motor unido a un peso descentrado.

La vibración del motor se puede activar o desactivar a través de cualquiera de los informes de salida. Poner a 1 el bit menos significativo (bit 0) del primer byte de cualquier informe de salida activará el motor de vibración, y ponerlo a 0 lo desactivará. Por ejemplo, el siguiente informe activará la vibración del motor:

```
(52) 11 01
```

Sin embargo, esto también tendrá el efecto colateral de apagar todos los diodos LED. Dado que no existe ningún informe de salida que sólo afecte a la vibración del motor, una aplicación podría necesitar almacenar los valores de la vibración y los diodos LED a nivel local (por ejemplo), y utilizar el mismo informe de salida para ambos. Otra posibilidad sería usar el informe de solicitud de estado (0x15). El bit de vibración necesita estar a 1 en cada uno de los informes enviados, para evitar desconectar la vibración sin quererlo.

El *Wii Remote* trabaja con el motor a 3,3 V en CC y 35 mA. Es razonable pensar que el motor de vibración se puede reemplazar por otro dispositivo con una tensión igual y una corriente igual o inferior.

Altavoz

El *Wii Remote* cuenta con un pequeño altavoz piezoeléctrico, de baja calidad y 21 mm que se utiliza para reproducir efectos cortos de sonido. El sonido se transmite directamente desde el host, y el altavoz tiene algunos parámetros ajustables.

El altavoz se controla mediante tres informes de salida, junto con una sección del espacio de direcciones del registro del *Wii Remote*.

El informe 0x14 se utiliza para activar o desactivar el altavoz. Establecer a 1 el bit 2 activará los altavoces, y ponerlo a 0 los desactivará. Por ejemplo, para habilitar el altavoz, se debe enviar:

```
(52) 14 04
```

El informe 0x19 se utiliza para silenciar o activar el altavoz, y funciona exactamente igual que el informe 0x14. 0x04 silenciará el altavoz, mientras que 0x00 lo activará.

El informe 0x18 se utiliza para enviar datos de los altavoces. Se pueden enviar de 1 a 20 bytes a la vez:

(52) 18 DD DD DD LL DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD DD

LL especifica la longitud de los datos, desplazados a la izquierda en tres bits. Los bytes DD son los datos de los altavoces. Para cumplir con los requisitos de tamaño del informe, los datos se deben rellenar si éste tamaño es menor de 20 bytes. Los datos de sonido se deben enviar a la velocidad adecuada.

Secuencia de inicialización. La siguiente secuencia inicializará el altavoz:

1. Activar el altavoz (enviar 0x04 al informe de salida 0x14).
2. Desactivar el altavoz (enviar 0x04 al informe de salida 0x19).
3. Escribir 0x01 en el registro 0xa20009.
4. Escribir 0x08 en el registro 0xa20001.
5. Escribir la configuración de 7 bytes (véase la siguiente sección) en los registros 0xa20001–0xa20008.
6. Escribir 0x01 en el registro 0xa20008.
7. Activar el altavoz (enviar 0x00 al informa de salida 0x19).

Configuración del altavoz. Siete bytes controlan la configuración de los altavoces, incluyendo el volumen. El propósito completo de estos bytes no se conoce, pero los siguientes valores parecen producir algún sonido:

00 RR FF RR VV 00 00

RR RR especifica la velocidad de muestreo (en formato *little-endian*). El valor estándar es 0x7d0, para una modulación por impulsos codificador (PCM) de 4 bits y 3000 Hz. FF configura el formato de datos. Si se establece a 0x40, configura el altavoz para utilizar PCM de 8 bits firmado, mientras que establecerlo a 0x00 lo configura para el uso de la modulación ADPCM de 4 bits. VV especifica el volumen, que tiene un rango de 0x00–0xFF para el modo de 8 bits, y 0x00–0x40 para el modo de 4 bits.

Esta configuración se puede usar para reproducir sonido con modulación ADPCM de 4 bits a 3000 Hz:

00 00 D0 07 40 00 00

Esta configuración se puede usar para reproducir de sonido PCM de 8 bits con una frecuencia de muestreo de 1500 Hz:

00 40 40 40 00 00 1F

4.2.7. La extensión *Wii MotionPlus*

El *Wii MotionPlus* (figura 4.6) es un dispositivo de expansión del controlador *Wii Remote* que permite capturar movimientos complejos con más precisión. Este dispositivo complementa al *Wii Remote* con información sobre rotaciones, ya que incorpora dos giroscopios: uno bidimensional (el *IDG-650* de *InvenSense* [65]), para medir cambios de orientación con respecto a los ejes transversal y longitudinal, y otro que mide cambios de orientación con respecto al eje vertical (el *X3500W* de *Epson Toyocom*, cuyas especificaciones se desconocen, pero que podrían ser similares a las del *XV-3500CB* [59,66]). La finalidad de usar esta combinación es contrarrestar las vibraciones existentes en reposo (debidas al ruido térmico) y aumentar la precisión de la captura de los datos.



Figura 4.6: La extensión *Wii MotionPlus* acoplada en un *Wii Remote*.

El *Wii MotionPlus* notifica su información como 6 bytes de datos, que se pueden leer en la dirección de memoria $0x(4)a40008$ (o $0x(4)a40000$ en algunos casos) y enviar utilizando cualquiera de los modos de presentación de informes que incluya bytes de extensión (los bytes no utilizados se rellenan con $0x00$). Los datos se empaquetan con el formato que se muestra en la tabla de la figura 4.7.

Mientras el *Wii Remote* está quieto, los valores estarán en torno a $0x1f7f$ (8063), aunque para obtener los valores cero reales es conveniente calibrar durante unos segundos tras la activación de la extensión. Por otro lado, los bits de modo rápido se activan cuando el giroscopio detecta rotaciones rápidas. Cuando este bit está activo, se

	Bit							
Byte	7	6	5	4	3	2	1	0
0	Velocidad en el eje vertical<7:0>							
1	Velocidad en el eje longitudinal<7:0>							
2	Velocidad en el eje transversal<7:0>							
3	Velocidad en el eje vertical<13:8>					Modo rápido del eje vertical		Modo rápido del eje transversal
4	Velocidad en el eje longitudinal<13:8>					Modo rápido del eje longitudinal		Conexión de extensión
5	Velocidad en el eje transversal<13:8>					1		0

Figura 4.7: Formato de datos del *Wii MotionPlus*.

está indicando que el valor proporcionado por el giroscopio para el eje correspondiente no es el real, y que debe multiplicarse por un factor estimado de 1,6.

4.3. Programación

Existe un gran número de librerías de programación que permiten gestionar el *Wii Remote*, aunque cada una ellas difiere de las demás en la cantidad y el tipo de características del mando que son capaces de controlar. La mayoría de las librerías son capaces de gestionar los datos de los botones, los acelerómetros, los diodos LED, la cámara de infrarrojos, el motor de vibración y el accesorio *Nunchuk*, aunque no se suelen dar necesariamente todas estas características a la misma vez. En cambio, no son tantas las librerías capaces de interpretar los datos provenientes de la expansión *Wii MotionPlus*. En este aspecto, de entre las librerías consultadas, se han encontrado las siguientes: *WiiC*, *WiiMoteLib*, *WiiYourself!* y *fWIIne*.

WiiC (versión 0.40) [67] es una librería para C/C++, libre y de código abierto, que proporciona soporte a las características más relevantes del *Wii Remote*, así como al *Wii MotionPlus* y otros periféricos (*Nunchuk*, *Classic Controller*, *Guitar Hero 3* y *Balance Board*). *WiiC* puede interpretar datos de varios *Wii Remote* simultáneamente y se puede ejecutar en los sistemas operativos *Mac OS X* y *Linux*.

WiiMoteLib (versión 1.8 Beta 1) [68] es una librería para C#, con la licencia *Microsoft Public License* (Ms-PL), que proporciona soporte a la mayoría de las características del *Wii Remote* y a otros periféricos (*Nunchuk*, *Classic Controller*, *Guitar Hero 3*, *Balance Board*, y el *TaTaCon* de *Taiko*), además del *Wii MotionPlus*. No obstante, el soporte a esta última extensión es limitado, ya que la librería se encuentra en versión de pruebas. *WiiMoteLib* puede interpretar los datos de varios mandos a la vez. La librería está orientada a la plataforma de desarrollo *Microsoft .NET*. En la figura 4.8 se

muestra un programa de prueba con todas las características del *Wii Remote* a las que da soporte.

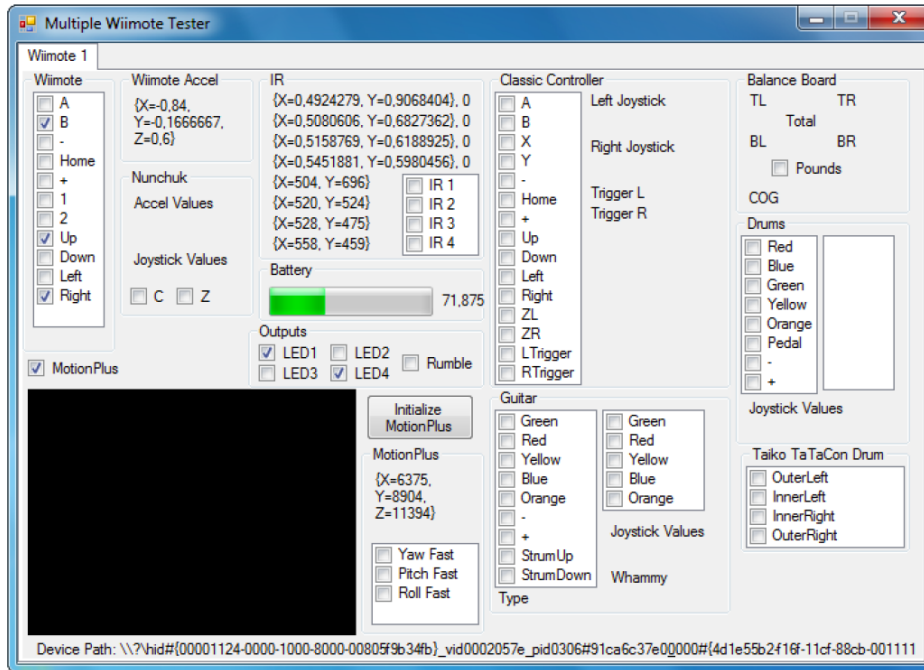


Figura 4.8: Captura de pantalla de un programa de pruebas de la librería *WiimoteLib*.

WiiYourself! (versión 1.15) [69] es una librería para C++, con licencia similar a las de BSD, basada en la librería anterior (*WiimoteLib*). Puede interpretar los datos de varios *Wii Remote* a la vez, y proporciona soporte a todas las características del mando, incluyendo su altavoz (aunque de forma experimental). También proporciona soporte a otros periféricos: *Nunchuk*, *Classic Controller*, *Wii MotionPlus*, *Balance Board*, el periférico de *Guitar Hero*. Tiene como limitaciones que sólo se ejecuta en entornos *Windows* y que, de acuerdo con su autor, la presente versión 1.15 será previsiblemente la última.

fWIIne (version 0.3) [70] es una librería para entornos de programación matemáticos, como *Matlab*, que proporciona soporte a la mayoría de las características del *Wii Remote* (aunque no ofrece soporte a los diodos LED). Permite reconocer la información de los accesorios *Nunchuk*, *Classic Controller* y *Wii MotionPlus*, y es capaz de trabajar hasta con cuatro *Wii Remote* conectados al mismo tiempo. Esta librería se puede utilizar desde cualquier sistema operativo que tenga instalado un entorno como *Matlab*, *Rlab* o *Scilab*.

De entre las librerías revisadas, la que más se aproxima a las necesidades de este proyecto de investigación es la librería *WiimoteLib*. Su código está completamente desarrollado en la plataforma *Microsoft .NET*, y es una de las pocas librerías que

incorporan la posibilidad de recibir información del accesorio *Wii MotionPlus*. También contiene una clase que le permite descubrir todos los *Wii Remote* que se encuentren conectados en el sistema, lo que puede resultar útil en el caso de que se tenga que capturar el movimiento en dos o más puntos del espacio simultáneamente. Además, dispone de un buen soporte técnico y de una continua actualización que la hacen muy adecuada para el propósito de este proyecto.

4.4. Conclusiones

El *Wii Remote* fue inicialmente concebido para ser el mando de la videoconsola *Wii* de *Nintendo*. Sin embargo, las características de sus componentes internos (en especial sus sensores de entrada de datos) y su bajo coste lo han convertido en un dispositivo con otras muchas aplicaciones potenciales. En la actualidad, el *Wii Remote* ya se ha aplicado a otros campos distintos al del entretenimiento, como pueden ser la realidad virtual [71], la robótica [72] o la rehabilitación [73, 74].

En el contexto de este proyecto de investigación, el *Wii Remote* se utilizará como un dispositivo de captura de movimiento, enfocado al desarrollo de tratamientos de rehabilitación y programas de entrenamiento deportivo que permitan prolongar la atención médica más allá del ámbito hospitalario.

Capítulo 5

Experimentación

5.1. Introducción

Para evaluar el funcionamiento del *Wii Remote* y de su extensión *Wii MotionPlus* se han realizado varias pruebas con sus sensores inerciales. En primer lugar, se han analizado las aceleraciones lineales proporcionados por los acelerómetros y las velocidades angulares proporcionadas por los giroscopios para evaluar el modo en que se detectan los cambios en la posición y la orientación.

En segundo lugar, se ha implementado una aplicación básica que procesa en tiempo real los datos del mando y representa gráficamente el movimiento. Esta aplicación se ha desarrollado con el lenguaje de programación C#, utilizando la implementación de *Microsoft Visual C# 2008*, el entorno *XNA Game Studio 3.1* y la biblioteca *WiimoteLib v1.8 Beta 1*.

5.2. Análisis del comportamiento de los acelerómetros del Wii Remote

Los acelerómetros del *Wii Remote* permiten medir la aceleración lineal en las tres direcciones ortogonales del espacio, siempre que no haya rotación. Si se rota el dispositivo cuando se pretende medir la posición en el espacio, la aceleración producida por la gravedad se malinterpreta como movimiento lineal. Los acelerómetros también se pueden usar como sensores de orientación mediante el seguimiento de la gravedad. Sin embargo, son incapaces de detectar las rotaciones en el eje vertical [75–77].

5.2.1. Detección de la orientación

Para comprobar que los acelerómetros del mando se pueden usar como sensores de orientación, se ha dejado un *Wii Remote* en reposo sobre una superficie plana horizontal, apoyado por cada uno de sus seis lados. En cada una de estas orientaciones se han obtenido mil valores de cada uno de los tres acelerómetros (sesenta valores cada segundo). Estos valores son datos en bruto proporcionados por el convertidor analógico–digital, es decir, números enteros comprendidos entre 0 y 255 (como se explicó en la sección 4.2.5).

Para analizar estos valores, se ha calculado la media aritmética o promedio (μ), la desviación típica (σ) y la moda (M_o) de cada una de las dieciocho muestras obtenidas. La media aritmética y la desviación típica son estadísticos útiles para determinar si el valor bruto de la aceleración, para una orientación y eje determinados, es el mismo en toda la muestra. La moda, por otro lado, permite conocer cuál es el valor que se repite con más frecuencia en la muestra. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 5.1.

Superficie de apoyo	Sobre el conector de extensión			Sobre la cámara infrarroja		
Acelerómetro	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z
Promedio (μ)	124,18	99	125,48	125	150	125,03
Desv. típica (σ)	0,39	0	0,50	0	0,06	0,18
Moda (M_o)	124	99	125	125	150	125
Superficie de apoyo	Sobre el botón B			Sobre los botones frontales		
Acelerómetro	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z
Promedio (μ)	124,17	125,00	151	125	124	101
Desv. típica (σ)	0,38	0,09	0	0	0	0
Moda (M_o)	124	125	151	125	124	101
Superficie de apoyo	Sobre el lateral izquierdo			Sobre el lateral derecho		
Acelerómetro	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z
Promedio (μ)	99,98	124,01	126,00	150	125	126,00
Desv. típica (σ)	0,26	0,21	0,06	0	0	0,06
Moda (M_o)	100	124	126	150	125	126

Tabla 5.1: Media aritmética, desviación típica y moda obtenidas a partir de muestras de mil valores proporcionadas por los acelerómetros para diferentes orientaciones del *Wii Remote*.

En la mayoría de las situaciones de reposo las medidas para algunos ejes de los acelerómetros presentan valores de la desviación típica σ distintos de 0. Esto significa que para una orientación y eje determinados, los acelerómetros no miden el mismo valor en reposo a lo largo del tiempo. Se ha podido comprobar experimentalmente que estas diferencias se producen entre dos únicos valores en los que, por lo general, uno de ellos siempre predomina más que el otro.

Por ejemplo, cuando el mando se ha dejado apoyado en vertical sobre la mesa (por el lado del conector de extensión), el valor medio de los valores devueltos por el acelerómetro en el eje X era de $124,18 \pm 0,39$; de acuerdo con la moda, el elemento más frecuente de la muestra era el valor 124, pero es fácil deducir que ésta también se componía de varios elementos con valor 125. En cambio, para esa misma orientación del mando, el valor medio de las medidas del acelerómetro para el eje Y era de 99, con una desviación típica nula, lo que permite interpretar que todos los elementos de esa muestra tenían el valor 99.

Estas oscilaciones entre dos valores en las medidas de los acelerómetros en reposo forman parte del funcionamiento normal del *Wii Remote* (no se deben a problemas de calibración) [78], y suelen ser pequeñas en la mayoría de los casos. En esta prueba, el valor medio de las muestras no se desvía demasiado de su moda (salvo el caso en el que el mando se apoya por el lado del conector de extensión, en el eje Z). Estas pequeñas oscilaciones pueden resultar problemáticas en aplicaciones que requieran una detección del movimiento precisa, ya que las variaciones en la aceleración lineal representan cambios en la velocidad del mando y, por lo tanto, también en su posición. Sin embargo, no son tan problemáticas en aplicaciones para la detección de la orientación, en las que ya se ha experimentado satisfactoriamente con el *Wii Remote* [79, 80].

Se ha comprobado experimentalmente que los valores de los estadísticos obtenidos para cada una de las orientaciones y ejes del *Wii Remote* en reposo no tienen por qué ser necesariamente los mismos con mandos diferentes al utilizado en esta prueba. Este hecho se deberá tener en cuenta a la hora de diseñar aplicaciones en las que se pueda utilizar cualquier *Wii Remote* del mercado y no uno en particular. Por ello, alguna de las referencias consultadas [59], sugiere las siguientes ecuaciones para estimar el punto central de cada eje (x_0, y_0, z_0) :

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad y_0 = \frac{y_1 + y_3}{2} \quad z_0 = \frac{z_2 + z_3}{2} \quad (5.1)$$

donde x_1 e y_1 son los valores de la aceleración en los ejes X e Y, respectivamente, cuando el mando está apoyado sobre el botón B; x_2 y z_2 son los valores en los ejes X y Z, respectivamente, cuando el mando está apoyado sobre la cámara infrarroja; e y_3 y z_3 son los valores en los ejes Y y Z, respectivamente, cuando el mando está apoyado sobre el lateral derecho. Para esta prueba, tomando los valores de la moda de la tabla 5.1, $(x_0, y_0, z_0) = (124,5, 124,5, 125,5)$.

5.2.2. Detección de la posición

Para comprobar cuál es la respuesta de los acelerómetros ante los movimientos del *Wii Remote* a lo largo del tiempo, se ha diseñado un itinerario con seis desplazamientos básicos (dos para cada uno de los tres ejes coordenados). El itinerario diseñado ha consistido en desplazar el mando, con movimientos rápidos y breves, de la siguiente manera:

1. Desde el punto de partida hasta unas decenas de centímetros a la derecha.
2. Desde el punto anterior hasta el punto de partida (desplazamiento hacia la izquierda).
3. Desde el punto de partida hasta unas decenas de centímetros arriba.
4. Desde el punto anterior hasta el punto de partida (desplazamiento hacia abajo).
5. Desde el punto de partida hasta unas decenas de centímetros atrás.
6. Desde el punto anterior hasta el punto de partida (desplazamiento hacia delante).

Tras la realización de cada punto del itinerario, se ha mantenido la posición resultante durante un segundo o más. El *Wii Remote* ha estado orientado de forma vertical en todo momento, esto es, con la cámara de infrarrojos apuntando hacia el techo. Se han utilizado guías de apoyo en los desplazamientos para evitar que el mando se desviara en su trayectoria y para conseguir que en cada movimiento se obtuviera una respuesta más pronunciada en un único eje del acelerómetro.

El objetivo de esta prueba es obtener los valores del tiempo y de cada uno de los ejes de los acelerómetros, mientras se realizan los seis desplazamientos, con una frecuencia aproximada de 60 muestras por segundo. Esta frecuencia es la que utiliza por defecto *XNA*, el entorno de programación elegido para desarrollar las aplicaciones con el *Wii Remote*, para actualizar los valores de sus variables. Aunque esta frecuencia se podría aumentar hasta las 100 actualizaciones por segundo (para que coincidiera con la velocidad de actualización del acelerómetro [58]), no se recomienda hacerlo, ya que va en detrimento de otros factores, como la frecuencia con la que se llama al método que dibuja en pantalla [81].

En esta prueba, a diferencia de la realizada anteriormente para detectar la orientación, no se han guardado los valores en bruto de los acelerómetros (números enteros entre 0 y 255), sino un equivalente normalizado que proporciona la biblioteca *WimotoLib* y que ésta calcula a partir de dichos valores en bruto. Usando este formato, los valores obtenidos son números reales, y suelen estar comprendidos en el intervalo $[-3, 3]$

(pueden adoptar valores mayores que $|3|$, pero no son exactos). En la figura 5.1 se representan los valores proporcionados por los tres ejes del acelerómetro tras la realización de los desplazamientos propuestos.

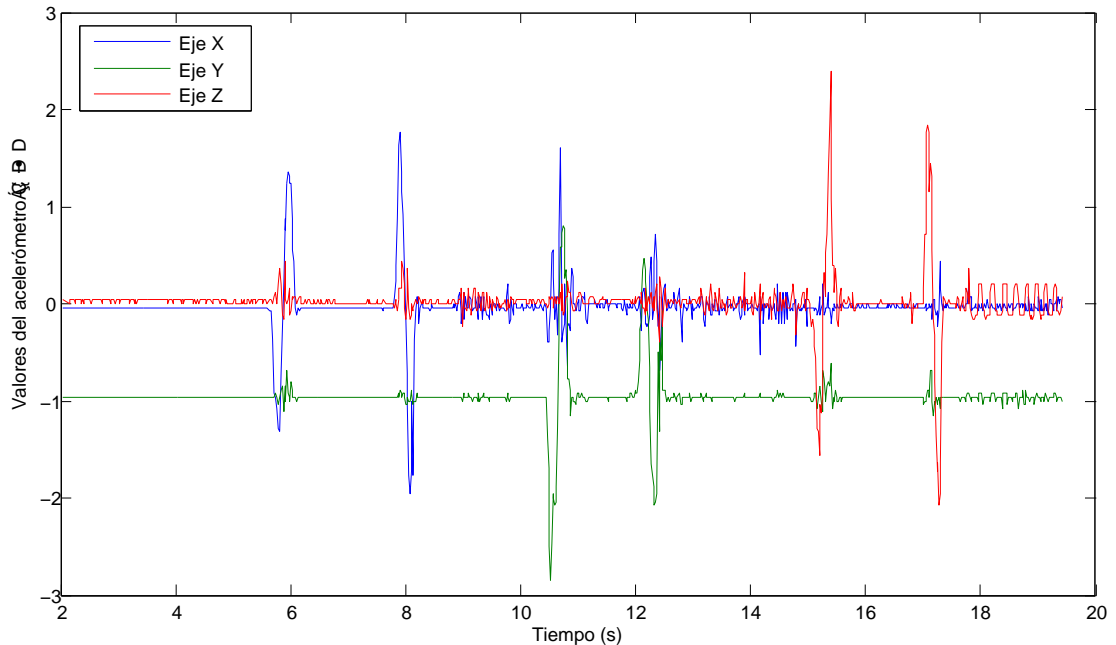


Figura 5.1: Valores proporcionados por los tres ejes del acelerómetro.

En la gráfica se distinguen claramente los momentos en los que empieza cada movimiento y sobre qué eje se están realizando: los desplazamientos sobre el eje X (derecha–izquierda), que se representan con una línea azul, tienen lugar a los 6 y a los 8 segundos, aproximadamente; los desplazamientos sobre el eje Y (arriba–abajo), que se representan con una línea verde, tienen lugar a los 10,5 y a los 12 segundos, aproximadamente; y los desplazamientos sobre el eje Z (atrás–adelante), que se representan con una línea roja, tienen lugar a los 15 y a los 17 segundos, aproximadamente.

Los datos del eje Y cuando el mando está en reposo (desde el inicio de la prueba hasta que comienza el primer desplazamiento) están centrados en torno a -1 , a diferencia de los datos de los otros dos ejes, que están centrados alrededor de 0 . Esto es así porque es el eje Y el que sufre el efecto de la aceleración de la gravedad, debido a la posición vertical en la que se ha mantenido el mando durante toda la prueba. Por esta razón, cuando el acelerómetro proporciona un valor en torno a la unidad, se puede considerar que la aceleración equivalente es de 1 G ($9,8\text{ m/s}^2$).

Una vez conocido esto, conviene aclarar que el eje vertical de la figura 5.1 está señalando, aproximadamente, una décima parte de los m/s^2 que debería mostrar en realidad. Lo mismo ocurre con las figuras de la velocidad y la posición calculada a

partir de las medidas del acelerómetro que se mostrarán a continuación: se deberían multiplicar por una constante a determinar para mostrar sus unidades reales. Esto no causa ningún perjuicio a la hora de implementar un programa que represente de forma gráfica los movimientos que se le aplican al mando, ya que los valores de la posición obtenidos para cada instante de tiempo se deberán multiplicar por un factor de escala (que se deberá obtener experimentalmente) que ajuste las imágenes a la ventana de la aplicación.

Para calcular la velocidad y la posición del mando a partir de los datos de la aceleración, es necesario que estos últimos estén centrados en 0 cuando el mando se encuentra en reposo. Esto supone eliminar la componente continua de las tres señales que el acelerómetro proporciona para cada eje.

Para ello, se han tomado los valores de las cien primeras muestras de cada señal del experimento (en las que el mando todavía se encuentra en reposo) y se ha calculado la media aritmética. Estos tres valores medios obtenidos se aproximan a la componente continua de cada una de las señales. Si a cada valor de las señales proporcionadas por los acelerómetros se le resta su correspondiente valor medio, la componente continua de cada señal desaparece.

Para esta prueba en particular, la media aritmética de las cien primeras muestras de cada eje del acelerómetro es de $\mu_X = -0,04$ para el eje X, $\mu_Y = -0,962$ para el eje Y y $\mu_Z = 0,035$ para el eje Z. Al restar estos valores a cada una de las muestras del eje correspondiente del acelerómetro, se obtienen las señales sin componente en continua, es decir, centradas en cero (figura 5.2). Si no se realizara esta compensación, las aceleraciones distintas de cero se interpretarían como cambios en la velocidad, y la posición variaría sus valores incluso con el mando en reposo.

Esta compensación es sencilla de implementar en un programa destinado a funcionar en tiempo real. Basta con dedicar los primeros segundos de la ejecución a recopilar los valores proporcionados por los acelerómetros del *Wii Remote*. Durante este intervalo inicial, el mando se deberá mantener en reposo y con la orientación que se vaya a utilizar mientras dure el resto de la ejecución.

Una vez eliminadas las componentes continuas de las señales del acelerómetro, se pueden obtener los valores de la velocidad y la posición. Para obtener las ecuaciones de movimiento se utiliza un método numérico conocido como Verlet–Velocidad, una variante de la integración de Verlet. Estas ecuaciones son las siguientes [82, 83]:

$$v(n) = v(n-1) + \frac{a(n-1) + a(n)}{2} \Delta t \quad (5.2)$$

$$x(n) = x(n-1) + v(n-1) \Delta t + \frac{1}{2} a(n-1) (\Delta t)^2 \quad (5.3)$$

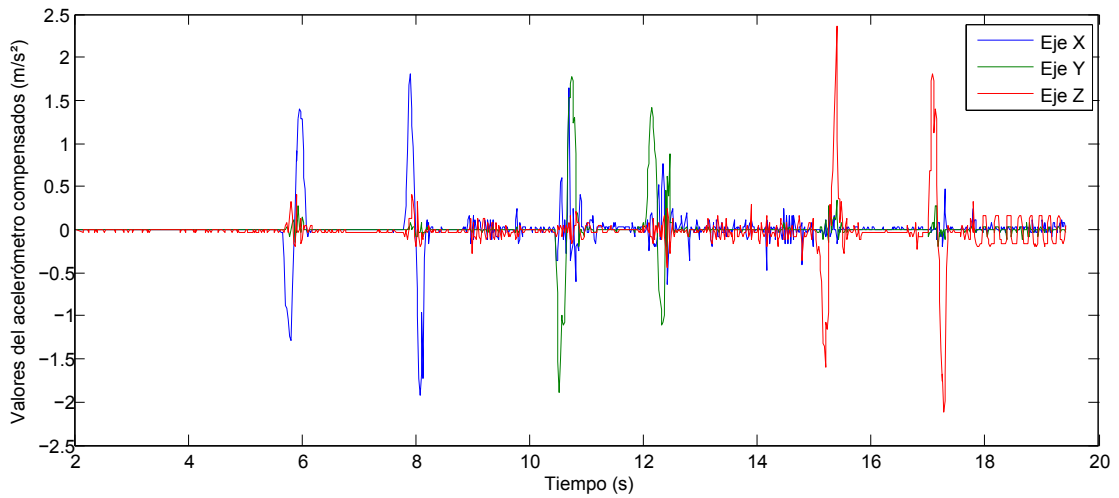


Figura 5.2: Valores proporcionados por los tres ejes del acelerómetro tras la supresión de la componente continua.

donde $x(n)$, $v(n)$ y $a(n)$ son los valores de la posición, la velocidad y la aceleración en el instante actual, $x(n-1)$, $v(n-1)$ y $a(n-1)$ son los valores de la posición, la velocidad y la aceleración en el instante anterior, y Δt es el tiempo transcurrido entre el instante anterior y el actual.

Al aplicar las ecuaciones 5.2 y 5.3 sobre los valores de la aceleración que componen las señales de la figura 5.2 se obtienen las señales de la velocidad de la figura 5.3 y las señales de la posición de la figura 5.4.

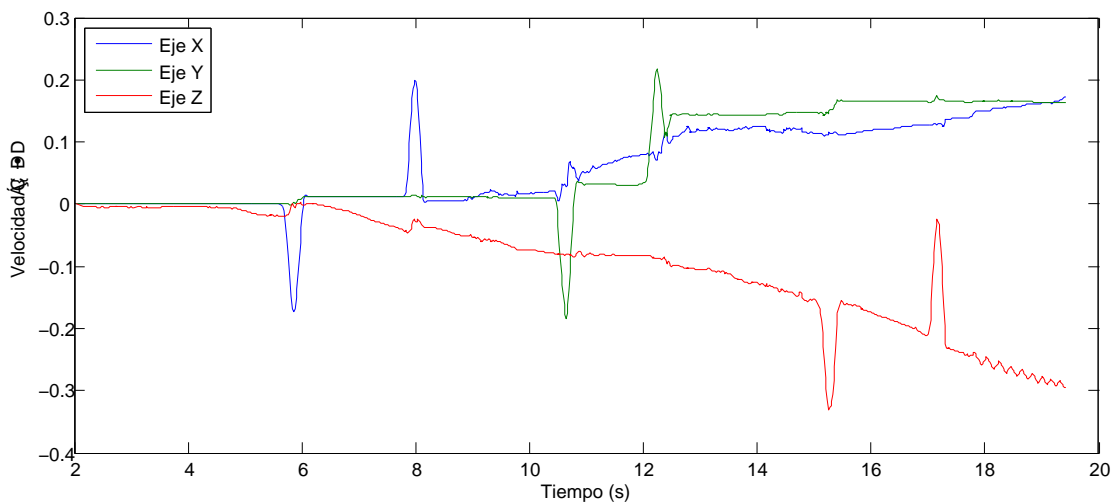


Figura 5.3: Velocidad calculada a partir de los valores de los acelerómetros.

En la figura de las velocidades (fig. 5.3) se observan los efectos de la deriva producida por los acelerómetros del *Wii Remote*. Aunque se puede apreciar cómo las velocidades

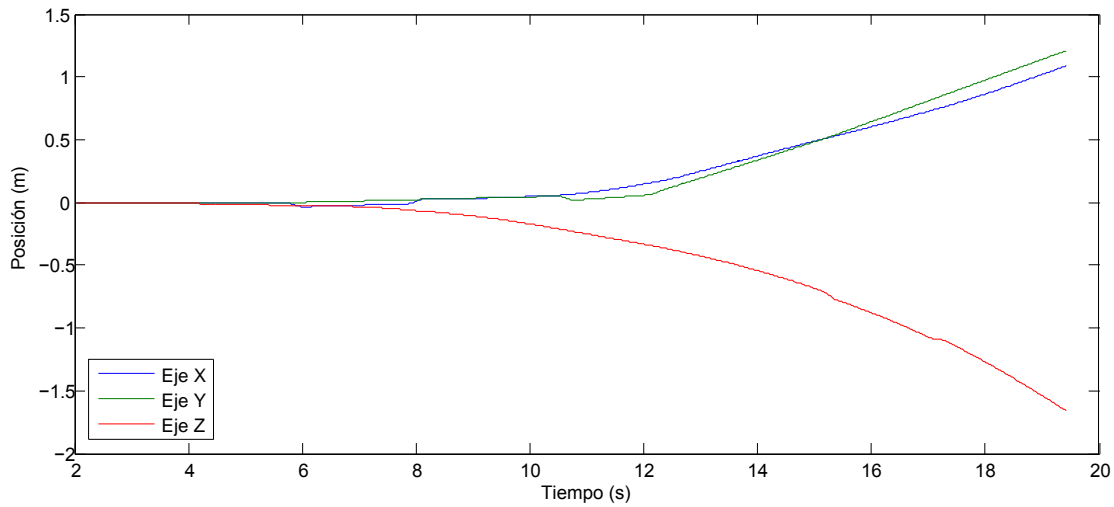


Figura 5.4: Posición calculada a partir de los valores de los acelerómetros.

aumentan y disminuyen para cada uno de los seis desplazamientos, esta deriva impide que sus valores se mantengan nulas cuando no existe movimiento en el mando. En vez de esto, las velocidades varían lenta y continuamente, alejándose de cero a medida que avanza el tiempo. La deriva se manifiesta aún más en las señales de la posición (fig. 5.4), que las aleja de cero a medida que avanza el tiempo sin que se pueda distinguir los desplazamientos de ida y vuelta del mando.

Si se acotan las anteriores señales de la aceleración, la velocidad y la posición para el eje X entre los 4 y los 10 segundos, se obtienen las señales de la figura 5.5. Estas señales, correspondientes a los desplazamientos derecha-izquierda, son las que menos deriva sufren en ese intervalo de tiempo, ya que todavía están próximas al inicio de la prueba. Esto permite hacerse una idea de cómo deberían ser las señales si no existiera la deriva. La señal de la velocidad sería muy similar a la de la figura, salvo por el hecho de que cuando no hay aceleración, su valor debería ser cero. La señal de la posición, por otro lado, también se parecería a la de la figura, pero no tendría la componente aditiva de la deriva que la hace desplazarse hacia valores positivos a medida que avanza el tiempo.

Para intentar corregir esta deriva se ha considerado la aplicación de filtros a la señal de la aceleración. El filtro de media móvil es el filtro más común en el procesamiento de señales digitales, ya que es el filtro más fácil de entender y usar. Se utiliza para suavizar las fluctuaciones a corto plazo y resaltar las tendencias o ciclos a largo plazo de una señal [84]. Como su nombre indica, el filtro de media móvil funciona calculando la media aritmética de un conjunto de valores consecutivos de la señal de entrada para producir cada uno de los valores de la señal de salida, como se indica en la siguiente

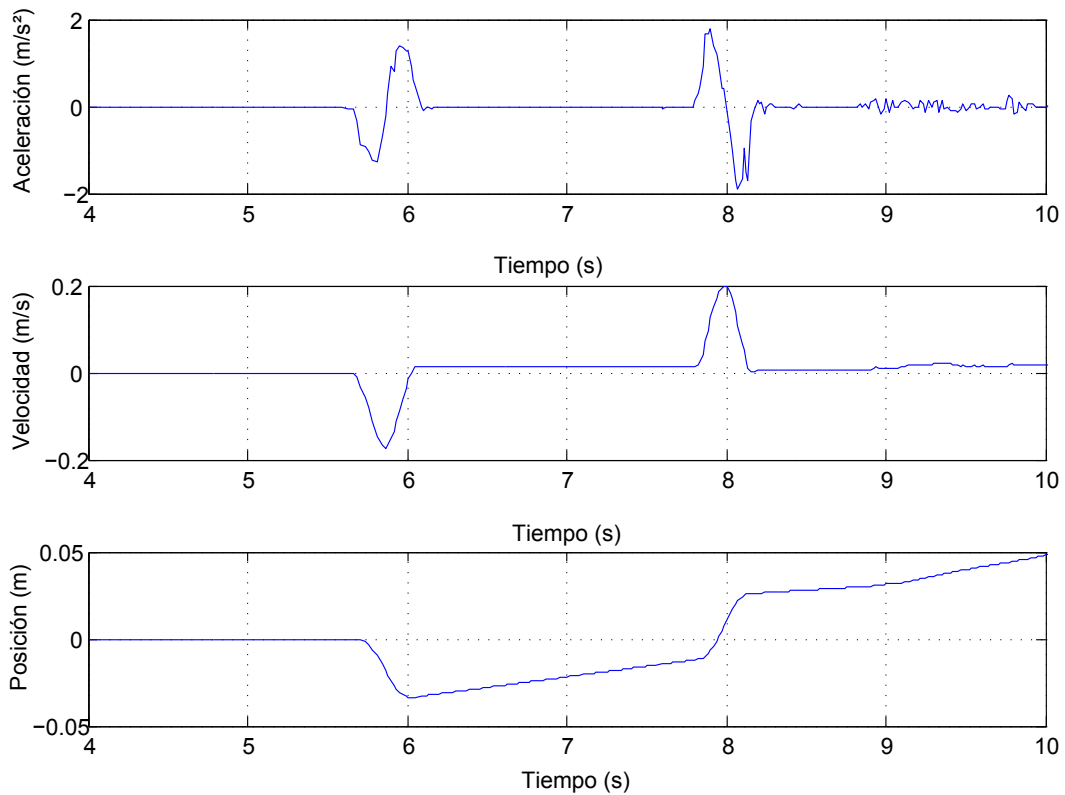


Figura 5.5: Aceleración, velocidad y posición del eje X del acelerómetro acotadas entre los 4 y los 10 segundos.

expresión matemática:

$$y(n) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(n-i) \quad (5.4)$$

En esta ecuación, $x()$ es la señal de entrada, $y()$ es la señal de salida y M es el número de valores empleado en la media móvil. Por ejemplo, un filtro de media móvil con $M = 3$ tiene la siguiente forma:

$$y(n) = \frac{1}{3} (x(n) + x(n-1) + x(n-2)) \quad (5.5)$$

Al aplicar un filtro de media móvil con $M = 10$ a la señal de la aceleración de la figura 5.2 se obtiene la señal que se muestra en la figura 5.6. Se aprecia una disminución importante en el ruido de la señal filtrada, mientras que se conserva la forma de los seis impulsos principales. Si se calcula la posición del dispositivo a partir de los valores filtrados de la aceleración, se obtienen las señales de la figura 5.7.

Si se compara la gráfica de la posición sin filtrar (figura 5.4) con la de la posición filtrada (figura 5.7) no se aprecia ninguna mejora sustancial en la deriva de las señales.

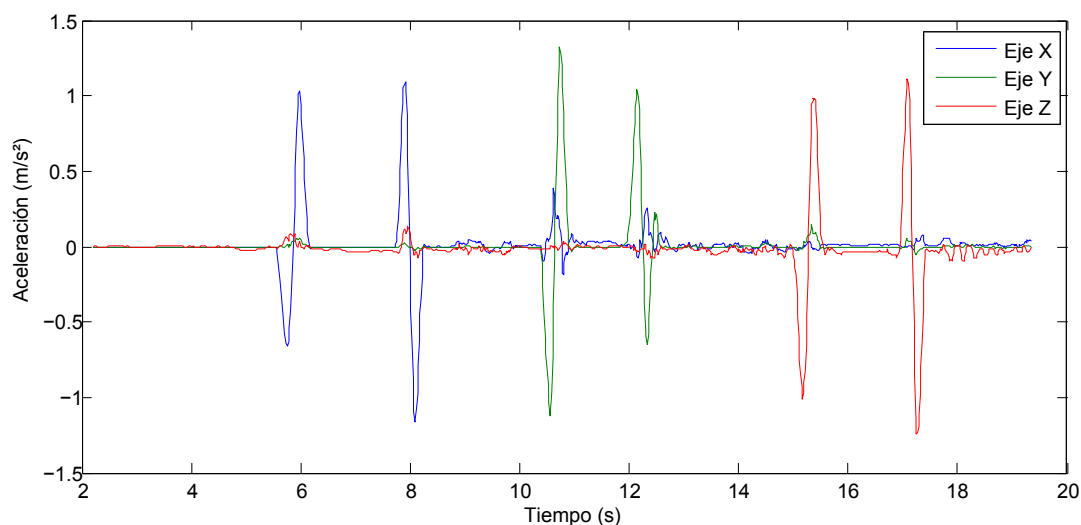


Figura 5.6: Valores de los acelerómetros a los que se les ha aplicado un filtro de media móvil de diez muestras.

En cambio, se ha comprobado experimentalmente que el programa desarrollado (descrito en la sección 5.4) representa por pantalla los desplazamientos del *Wii Remote* de una forma más suave cuando se aplica el filtro que cuando no se aplica. Esto es así porque el filtro consigue atenuar las vibraciones producidas por la mano que sostiene el mando.

5.3. Análisis del comportamiento de los giroscopios del Wii MotionPlus

Los giroscopios del *Wii MotionPlus*, a diferencia de los acelerómetros, permiten medir directamente todo tipo de rotaciones (velocidades angulares). Son muy sensibles y no amplifican las vibraciones tanto como los acelerómetros [76, 77].

5.3.1. Detección de la orientación

Para comprobar cómo se pueden usar los giroscopios para medir los cambios de orientación del mando, se ha dejado el *Wii Remote* en reposo sobre una superficie plana horizontal y apoyado por el lado del botón B. A continuación, se le han aplicado dos giros completos alrededor de su eje vertical en el sentido contrario al de las agujas del reloj, con una diferencia de cuatro segundos entre cada uno de ellos. Los datos devueltos por el giroscopio se muestran en la figura 5.8.

Los valores del giroscopio en esta prueba están comprendidos entre las 8000 y

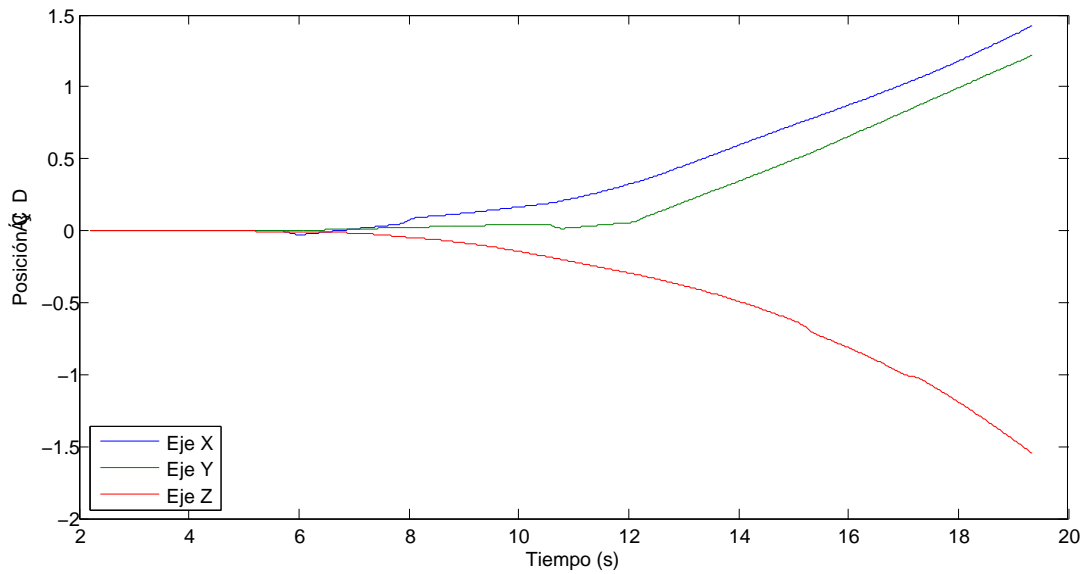


Figura 5.7: Valores de la posición del mando a partir de las señales de los acelerómetros a los que se les ha aplicado un filtro de media móvil de diez muestras.

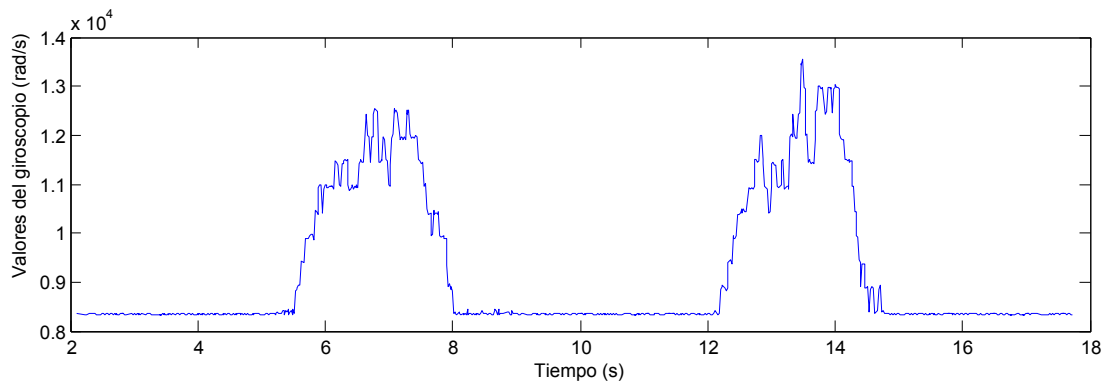


Figura 5.8: Medida de la velocidad angular en el eje vertical tras dos giros completos.

las 14 000 unidades, siendo el valor medio del mando en reposo de 8347 unidades. Este valor medio se ha calculado siguiendo el mismo procedimiento que se siguió en la sección anterior con los acelerómetros, esto es, a partir de las cien primeras muestras de la señal. Si se resta esta cantidad a cada uno de los valores de la prueba anterior se consigue suprimir la componente continua de la señal.

La ecuación 5.6 muestra cómo obtener la posición angular a partir de la velocidad angular [85]:

$$\theta(n) = \theta(n - 1) + \omega(n - 1)\Delta t \quad (5.6)$$

Al aplicar la ecuación anterior a los datos de la velocidad angular sin componente

en continua, se obtienen las señales de la figura 5.9.

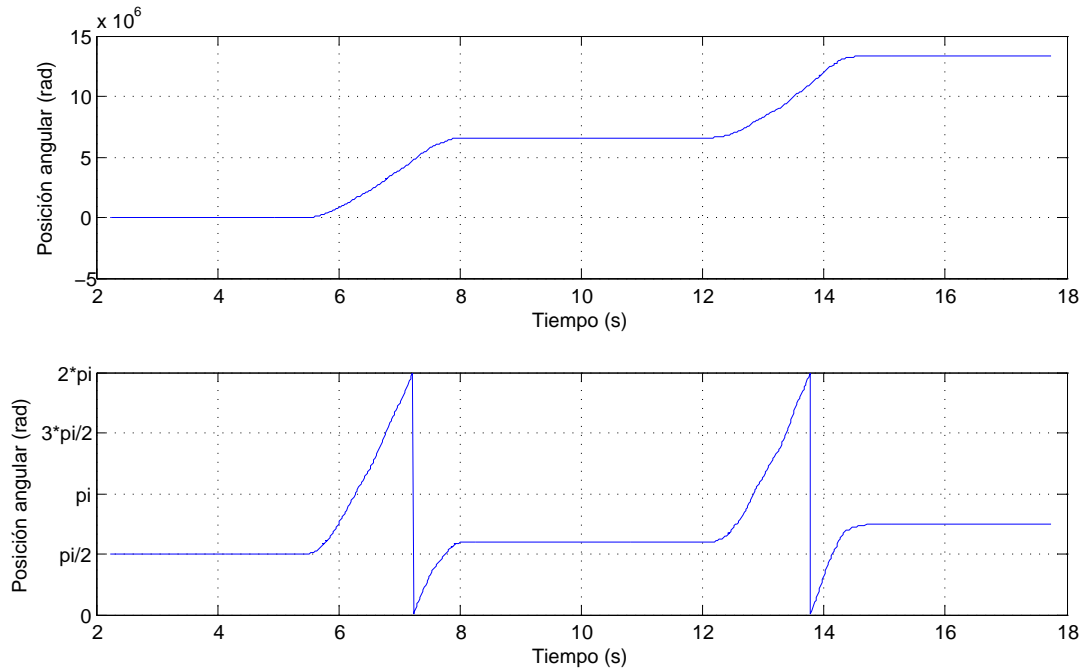


Figura 5.9: Medida de la posición angular en el eje vertical tras dos giros completos.

Las dos señales de esta figura son equivalentes. En la parte superior se muestran los valores de la posición angular θ sin tener en cuenta que el valor de θ debe estar comprendido entre 0 y 2π radianes. En la parte inferior, sí que se tiene en cuenta este intervalo. Esta última figura es interesante porque permite apreciar cómo, tras cada una de las dos rotaciones, la señal sufre una pequeña deriva que le impide permanecer en $\theta = \pi/2$, que es el valor del desfase inicial con el que se ha decidido representar la figura.

Se ha realizado una segunda prueba que utiliza las medidas en los tres ejes de los giroscopios en un intervalo de tiempo más prolongado que el anterior. En esta prueba, se ha vuelto a dejar el mando en reposo sobre una superficie plana horizontal y apoyado por el lado del botón B. A continuación, se han realizado los siguientes cambios de orientación en el dispositivo:

1. Desde la orientación inicial, se realiza un giro de 2π radianes en el eje vertical, en el sentido contrario al de las agujas del reloj.
2. Desde la orientación anterior, se vuelve a la orientación inicial (giro de 2π radianes en el eje vertical en el sentido de las agujas del reloj).

3. Desde la orientación inicial y evitando desplazamientos, se realiza un giro de 2π radianes en el eje longitudinal, en el sentido contrario al de las agujas del reloj.
4. Desde la orientación anterior, se vuelve a la orientación inicial (giro de 2π radianes en el eje longitudinal en el sentido de las agujas del reloj).
5. Desde la orientación inicial y evitando desplazamientos, se realiza un giro de 2π radianes en el eje transversal, en el sentido de las agujas del reloj.
6. Desde la orientación anterior, se vuelve a la orientación inicial (giro de 2π radianes en el eje transversal en el sentido contrario al de las agujas del reloj).

En la figura 5.10 se muestran las tres señales producidas por el giroscopio una vez realizadas las seis rotaciones anteriores y después de eliminar la componente en continua. Se comprueba cómo las velocidades dan valores negativos cuando los giros se realizan en el sentido de las agujas del reloj y valores positivos cuando los giros se realizan en el sentido contrario.

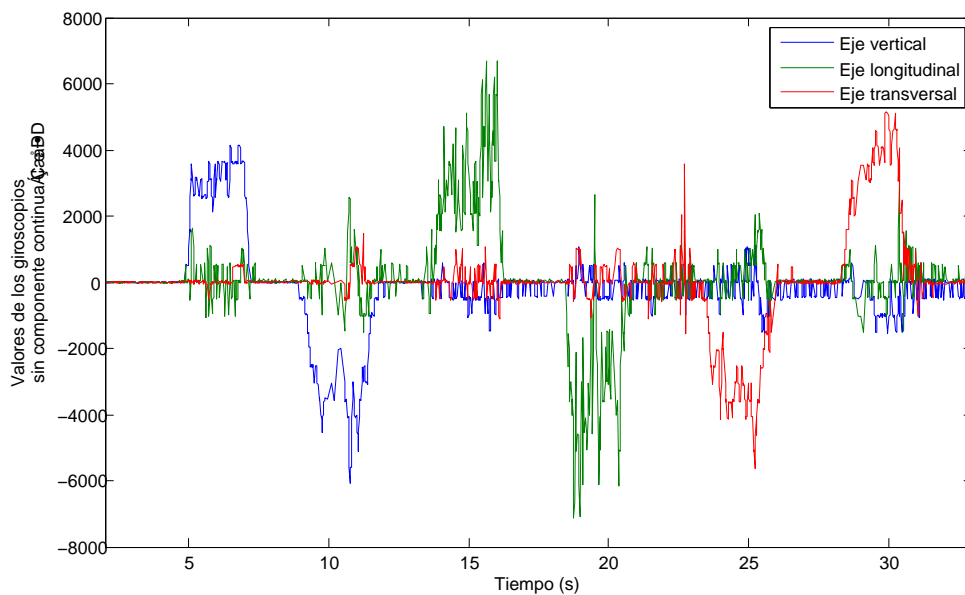


Figura 5.10: Señales del giroscopio tras la realización de la segunda prueba.

Aplicando la ecuación 5.6 a los datos normalizados de las señales representadas en la figura 5.10 se obtienen los valores de la posición del mando en cada uno de los tres ejes de rotación. Estos valores se representan en la figura 5.11.

Para facilitar la interpretación, las señales de los tres giroscopios se han representado con un desfase inicial de $\pi/2$ radianes. Se aprecia claramente cómo la deriva de los giroscopios impide que la señal de cada eje de rotación permanezca constante en $\pi/2$ radianes cuando no se está realizando ninguna rotación.

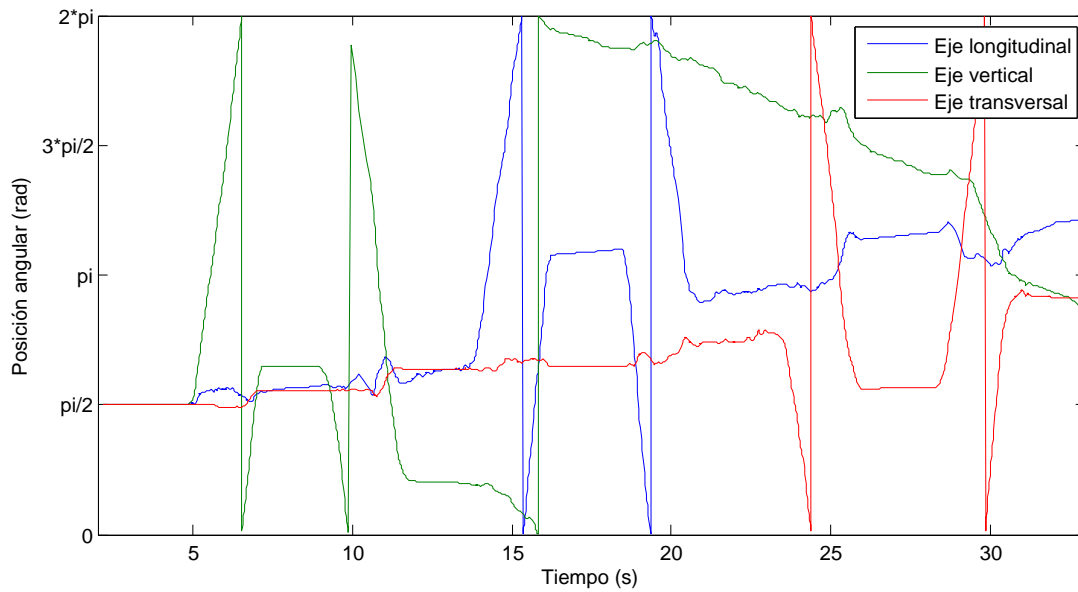


Figura 5.11: Señales de la posición calculadas tras la realización de la segunda prueba.

5.4. Programa desarrollado

Una vez analizado el comportamiento de los datos proporcionados por los acelerómetros y giroscopios del *Wii Remote* y su extensión *Wii MotionPlus*, se ha desarrollado un programa con el lenguaje de programación C# capaz de representar el movimiento que se le aplica al mando en tiempo real y de forma gráfica. Para su programación, se han utilizado la implementación *Microsoft Visual C# 2008* y el entorno de trabajo *XNA Game Studio 3.1*, que facilitan la representación gráfica de figuras tridimensionales por pantalla, mientras que para la interacción con el dispositivo, se ha empleado la librería de programación *WiimoteLib v1.8 Beta 1*.

Para representar el mando por pantalla se ha diseñado un prisma rectangular al que se le han añadido las texturas del *Wii Remote* a cada una de sus caras. Con el fin de representar su movimiento, los valores que los acelerómetros y los giroscopios van proporcionando en cada ejecución del programa se procesan conforme a las ecuaciones de las posiciones lineal y angular estudiadas anteriormente (ecuaciones 5.3 y 5.6). El tiempo de procesamiento es despreciable, por lo que la representación en pantalla se puede considerar que es en tiempo real. La aplicación incluye un filtro de media móvil como el descrito en las secciones anteriores, que consigue que el movimiento sea fluido y se ajuste a la realidad durante los primeros segundos. Pasado este lapso de tiempo, empiezan a manifestarse los primeros efectos de la deriva, que termina por desplazar la figura del dispositivo fuera de la ventana.

No obstante, la representación del movimiento no es la única funcionalidad con la

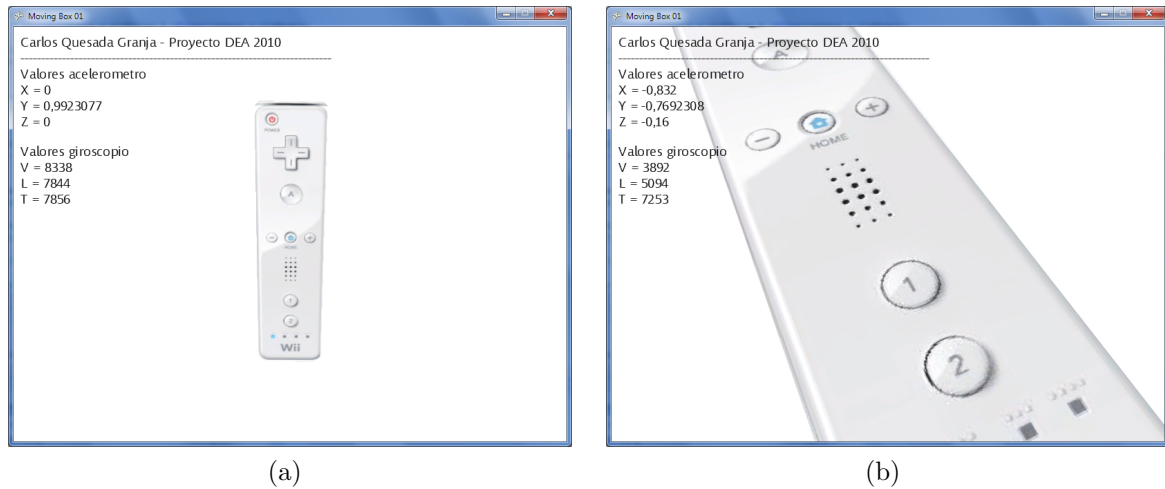


Figura 5.12: Capturas de pantalla del programa desarrollado.

que se ha dotado a esta aplicación. El programa reconoce cuándo se pulsa cada uno de los botones del mando, y lo resalta en pantalla cada vez que esto ocurre. Además, utiliza el botón B para reiniciar la velocidad y la posición (tanto lineales como angulares) de la figura en pantalla, característica útil cuando la deriva comienza a dificultar el correcto control del dispositivo. La aplicación también permite controlar el desplazamiento y la rotación de la figura por teclado, y muestra en todo momento, superpuestos en pantalla, los valores proporcionados por los acelerómetros y giroscopios. En la figura 5.12 se muestran dos capturas de pantalla de la aplicación: a la izquierda con el mando en reposo y a la derecha con el mando en movimiento.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Aportaciones

En esta memoria de investigación, se ha presentado un análisis detallado sobre las tecnologías de captura de movimiento más habituales y se han descrito las características de los dispositivos comerciales más representativos que se pueden encontrar actualmente en el mercado. Este análisis se ha realizado con el fin de seleccionar el dispositivo más apropiado que, por sus características de usabilidad y bajo coste, permita su aplicación a tratamientos de rehabilitación y programas de entrenamiento deportivo.

Tras seleccionar el *Wii Remote* de *Nintendo*, por la relación que existe entre sus características de captura inercial y su coste, se ha documentado su hardware y se ha elegido la librería más apropiada para su programación. Una vez definido el marco de trabajo, se han realizado pruebas de adquisición de datos mediante la aplicación de desplazamientos y rotaciones al dispositivo para analizar el comportamiento de sus acelerómetros y giroscopios. A partir estas medidas, se ha hallado la forma de obtener la posición y la orientación del dispositivo en cada instante de tiempo. Finalmente, se ha desarrollado una aplicación informática básica en la que se representan, en tiempo real y de forma gráfica, los movimientos que se le transmiten al mando.

6.2. Líneas futuras

Los acelerómetros y giroscopios inerciales basados en sistemas microelectromecánicos, como los que incorporan el *Wii Remote* y el *Wii MotionPlus* de *Nintendo*, se usan en una gran variedad de aplicaciones debido a su bajo coste, pequeño tamaño y a que no requieren de fuentes externas (distintas del sujeto de captura) para su funcionamiento.

Sin embargo, las medidas de los acelerómetros y los giroscopios requieren de integración numérica para obtener la posición y la orientación. Debido al ruido y a las desviaciones presentes en las medidas inerciales, este proceso no se puede realizar durante largos periodos de tiempo, ya que los errores en las estimaciones aumenta de forma continua [75, 86–88]. La supresión de la deriva es, por lo tanto, la principal tarea que se debe resolver a corto plazo, ya que es fundamental para el desarrollo de cualquier aplicación enfocada a la rehabilitación o la medicina deportiva.

Uno de los métodos más utilizados para corregir la deriva consiste en reducir el ruido de las señales de los sensores aplicando filtros digitales, como ya se hizo con el filtro de media móvil en las pruebas del capítulo anterior. En [89] se analizan otros filtros más adecuados para mejorar la respuesta de un sólo acelerómetro.

Varias de las referencias consultadas [90–92] proponen el uso de filtros de Kalman cuando se combinan las señales de giroscopios y acelerómetros para detectar orientaciones. Los filtros de Kalman son filtros capaces de realizar el seguimiento de una señal variante en el tiempo en presencia de ruido y otras imprecisiones, reduciendo en gran medida la deriva de la señal. Sin embargo, tienen un serio inconveniente en cuanto a su coste computacional, que es inaceptable en algunas aplicaciones con restricciones [86].

Existen otras aplicaciones basadas en la detección de la orientación que también combinan las señales de los acelerómetros y los giroscopios sin utilizar filtros de Kalman. En su lugar, utilizan una composición de diferentes filtros (paso-bajo en acelerómetros, Butterworth en giroscopios) [93] o se sirven de métodos propios de cálculo [75].

Otra opción para reducir la deriva de las señales es usar los datos provenientes de una tercera fuente de datos. Se ha documentado una aplicación [88] que mide posiciones y orientaciones usando acelerómetros y giroscopios, y que corrige su deriva usando los datos proporcionados por una cámara que se desplaza con los sensores. Esta aplicación emplea filtros de Kalman extendidos, y consigue precisiones del orden de milímetros (posiciones) e inferiores a los grados (orientaciones). Esta alternativa es interesante porque el *Wii Remote* incorpora un sensor de infrarrojos que no se ha utilizado en las pruebas experimentales del capítulo anterior y que podría ser de utilidad en la detección del movimiento.

El nivel alcanzado en la investigación sugiere avanzar en el estudio de alguna de las propuestas anteriores con el fin de eliminar (o minimizar lo máximo posible) la deriva de las señales proporcionadas por los sensores del *Wii Remote*. Una vez resuelta esta cuestión, será más fácil avanzar en el desarrollo de aplicaciones para tratamientos de rehabilitación y programas de entrenamiento deportivo.

Apéndice A

Glosario

3DOF, 6DOF: Véase *grados de libertad*.

Acelerómetro: Dispositivo que mide la aceleración que se le aplica externamente.

Adherencia terapéutica: Grado en que el comportamiento de una persona (tomar medicamentos, seguir un régimen alimentario, ejecutar cambios en el estilo de vida, etc.), se corresponde con las recomendaciones acordadas con un prestador de asistencia sanitaria.

Autosuficiente: Se dice del dispositivo que no requiere soporte de ningún otro aparato.

Biofeedback: Proceso de concienciación de varias funciones fisiológicas usando instrumentos que proporcionan información sobre la actividad de esos mismos sistemas, con el objetivo de ser capaz de manipularlos a voluntad. Los procesos que se pueden controlar incluyen a las ondas cerebrales, el tono muscular, la conductividad de la piel, la frecuencia cardíaca y la percepción del dolor.

Bluetooth: Estándar abierto de tecnología inalámbrica para el intercambio de datos a corta distancia desde dispositivos fijos y móviles. Utiliza ondas cortas de radio y permite la creación de redes de área personal con altos niveles de seguridad.

Calibración: Determinación o comprobación de la exactitud de un sistema.

Descriptor de HID: Véase *dispositivo de interfaz humana*.

Dispositivo de interfaz humana: En inglés, *human interface device* o *HID*. Cualquier dispositivo que interactúa directamente con las personas, interpreta sus órdenes y necesidades, y las transmite al host a través de un protocolo (protocolo HID). Cada dispositivo define las características principales de sus paquetes de datos en un *descriptor de HID*, que el host debe conocer para el correcto funcionamiento del sistema. Este descriptor de HID define los paquetes de datos que emite el dispositivo (número de paquetes soportados, tamaño de cada paquete, campos de cada paquete, su función y la de cada bit dentro de cada campo).

DOF: Véase *grados de libertad*.

EEPROM: En inglés, *electrically erasable programmable read-only memory* (memoria de sólo lectura programable y borrable de forma eléctrica). Un tipo de memoria no volátil usada en ordenadores y otros dispositivos electrónicos para almacenar pequeñas cantidades de datos que se deben guardar cuando se quita la alimentación, como por ejemplo, tablas de calibración o la configuración del dispositivo.

Exactitud: Medida del error en la posición y la orientación proporcionados por un dispositivo de captura de movimiento.

Firmware: Programas y estructuras de datos, normalmente de pequeño tamaño y fijos, que controlan internamente un dispositivo electrónico.

Giroscopio: Dispositivo que mide la orientación, basado en los principios de la conservación del momento angular.

Grados de libertad: En inglés, *degrees of freedom* o *DOF*. Número de variables independientes que especifica la localización de un objeto. En el espacio tridimensional, un objeto rígido puede tener un máximo de seis grados de libertad (6DOF), que son las traslaciones en los ejes x , y y z y las rotaciones en los ejes transversal, longitudinal y vertical.

HID: Véase *dispositivo de interfaz humana*.

HMD: Véase *visor montado en casco*.

IMU: Véase *unidad de medida inercial*.

INS: inertial navigation systems

Latencia: La diferencia de tiempo desde que se produce un cambio en la posición y la orientación hasta que el ordenador detecta este cambio.

LED: En inglés, *light-emitting diode* (diodo emisor de luz). Fuente de luz basada en un diodo semiconductor, un componente electrónico que conduce la corriente eléctrica en una sola dirección.

Magnetómetro: Dispositivo que mide la fuerza o la dirección de un campo magnético.

MEMS: Véase *sistema microelectromecánico*.

Offset: El número de posiciones de memoria que se debe sumar a una dirección base para conseguir una dirección absoluta.

Protocolo de descubrimiento de servicios: En inglés, *service discovery protocol* o *SDP*. Protocolo que permite a las aplicaciones cliente descubrir la existencia de diversos servicios proporcionados por uno o varios servidores de aplicaciones, junto con los atributos y propiedades de los servicios que se ofrecen. Estos atributos de servicio incluyen el tipo o clase de servicio ofrecido y el mecanismo o la información necesaria para utilizar dichos servicios.

Realidad aumentada: Visión de un entorno del mundo real a cuyos elementos se les han superpuesto imágenes virtuales generadas por ordenador.

Realidad virtual: Entornos diseñados por ordenador que pueden simular lugares del mundo real o ficticios. La mayoría de los entornos actuales son experiencias visuales que se reproducen en monitores o a través de pantallas estereoscópicas especiales. Algunas simulaciones incluyen información sensorial adicional, como sonido.

Resolución: El menor cambio en la posición y la orientación que puede detectar un dispositivo de captura de movimiento.

SDP: Véase *protocolo de descubrimiento de servicios*.

Sistema microelectromecánico: En inglés, *microelectromechanical system* o *MEMS*. Tecnología que emplea componentes de tamaño comprendido entre 1 y 100 micrómetros. Los dispositivos con esta tecnología miden por lo general entre 20 micrómetros y un milímetro. Suelen constar de una unidad central que procesa datos y varios microsensores que actúan con el exterior.

Usabilidad: Estudio de la facilidad con la que se puede emplear una herramienta en particular (o cualquier otro objeto fabricado por una persona) para conseguir una meta concreta. En el contexto de la informática, también se refiere a la elegancia y la claridad con la que se diseña la interacción con un programa de ordenador o un sitio web.

Unidad de medida inercial: En inglés, *inertial measurement unit* (IMU). Dispositivo electrónico que mide aceleraciones lineales y velocidades angulares usando una combinación de acelerómetros y giroscopios.

Velocidad de actualización: Velocidad con la que un dispositivo de captura de movimiento proporciona las medidas de la posición y la orientación al ordenador.

Visor montado en casco: En inglés, *helmet mounted display* (HMD). Dispositivo con forma de casco que proyecta información en un visor integrado.

Volumen de captura: El volumen en el que un dispositivo de captura de movimiento puede medir la posición y la orientación con la exactitud y la resolución especificadas.

Referencias

- [1] European Commission, Directorate-General for the Information Society y Media. European funding and priorities for ICT research (2007–2013), User guide, 2008. http://ec.europa.eu/information_society/doc/ictresearch-fundingpriorities.pdf. Último acceso el 19 de abril de 2010.
- [2] European Commission. 20 years of European Commission's support to the development of eHealth, 2010. http://ec.europa.eu/information_society/newsroom/cf/itemlongdetail.cfm?item_id=5712. Último acceso el 19 de abril de 2010.
- [3] José M. Tormos, Eloy Opisso y Enrique J. Gómez. *Introducción a la telerrehabilitación*, capítulo 1, páginas 17–21. Análisis del estado actual de los servicios de telemedicina enfocado a evaluar la viabilidad de un programa de telerrehabilitación en pacientes con una gran discapacidad de origen neurológico. Informes, Estudios e Investigación 2007 – Ministerio de Sanidad y Consumo, 2006.
- [4] PRESENCIA Project Website. <http://www.presencia.org/>. Último acceso el 27 de abril de 2010.
- [5] Mel Slater, Daniel Perez-Marcos, H Henrik Ehrsson y Maria V Sanchez-Vives. Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Front Hum Neurosci*, 2:6, 2008. ISSN 1662-5161.
- [6] Borja Rodríguez, Montserrat Bernabeu y Eloy Opisso. *Experiencias en telemedicina y telerrehabilitación*, capítulo 4, páginas 41–54. Análisis del estado actual de los servicios de telemedicina enfocado a evaluar la viabilidad de un programa de telerrehabilitación en pacientes con una gran discapacidad de origen neurológico. Informes, Estudios e Investigación 2007 – Ministerio de Sanidad y Consumo, 2006.

- [7] Mauro Zampolini, Elisabetta Todeschini, Montserrat Bernabeu Guitart, Hermie Hermens, Stephan Ilsbroukx, Velio Macellari, Riccardo Magni, Marco Rogante, Sandro Scattareggia Marchese, Miriam Vollenbroek y Claudia Giacomozzi. Tele-rehabilitation: present and future. *Ann Ist Super Sanita*, 44(2):125–134, 2008.
- [8] M. Á. Arcas Patricio, D. M. Gálvez Domínguez, J. C. León Castro, S. L. Paniagua Román y M. Pellicer Alonso. *Manual de Fisioterapia. Traumatología, afecciones cardiovasculares y otros campos de actuación. Módulo III*. Editorial Mad, S. L., 2004. ISBN 8466538399.
- [9] Thomas B. Moeslund y Erik Granum. A survey of computer vision-based human motion capture. *Computer Vision and Image Understanding*, 81:231–268, 2001.
- [10] Axel Mulder. Human movement tracking technology. Informe Técnico 94-1, School of Kinesiology, Simon Fraser University, July 1994.
- [11] Alberto Menache. *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2000. ISBN 0124906303.
- [12] Richard C. Hebb, Ronald S. Wolff y Edward J. Purvis. Weapons simulation tracking systems (Testing methods). Special report 98-012, Naval Air Warfare Center, Training Systems Division, Orlando, Fl. 32826–3275, September 1998.
- [13] Devesh K. Bhatnagar. Position trackers for head mounted display systems: A survey. Informe técnico, Chapel Hill, NC, USA, 1993.
- [14] Nathaniel I. Durlach, Anne S. Mavor y National Research Council (U.S.). Committee on Virtual Reality Research and Development. *Virtual reality: scientific and technological challenges*. National Academies Press, 1995.
- [15] William Frey, Michael Zyda, Robert Mcghee y Bill Cockayne. Off-the-shelf, real-time, human body motion capture for synthetic environments, 1996.
- [16] G. Welch y E. Foxlin. Motion tracking: no silver bullet, but a respectable arsenal. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 22(6):24–38, Nov. – Dec. 2002. ISSN 0272-1716. doi:10.1109/MCG.2002.1046626.
- [17] Nicholas Michael Vallidis. *WHISPER: A Spread Spectrum Approach to Occlusion in Acoustic Tracking*. Tesis Doctoral, 2002.

-
- [18] Daniel Vlastic, Rolf Adelsberger, Giovanni Vannucci, John Barnwell, Markus Gross, Wojciech Matusik y Jovan Popovic. Practical motion capture in everyday surroundings. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), Jul. 2007.
- [19] Midori Kitagawa y Brian Windsor. *MoCap for Artists: Workflow and Techniques for Motion Capture*. Focal Press, 2008.
- [20] Inition. <http://www.inition.co.uk/>. Último acceso el 15 de marzo de 2010.
- [21] Thomas Gary Bishop. *Self-tracker: a smart optical sensor on silicon*. Tesis Doctoral, 1984.
- [22] Michael Gleicher. Animation from observation: Motion capture and motion editing. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 33(4):51–54, Nov. 1999. ISSN 0097-8930. doi:<http://doi.acm.org/10.1145/345370.345409>.
- [23] Edilson de Aguiar. *Character Animation from a Motion Capture Database*. Master thesis in computer science, University of Saarland, Nov. 2003.
- [24] A. Sundaresan y R. Chellappa. Markerless motion capture using multiple cameras. En *Computer Vision for Interactive and Intelligent Environment, 2005*, páginas 15–26. 2005. doi:10.1109/CVIEE.2005.13.
- [25] Mario Gutiérrez, Frédéric Vexo y Daniel Thalmann. *Stepping into Virtual Reality*. Springer-Verlag TELOS, Santa Clara, CA, USA, 2008. ISBN 1848001169, 9781848001169.
- [26] Jannick P. Roll, Yohan Baillot y Alexei A. Goon. *A survey of tracking technology for virtual environments*, capítulo 3, páginas 67–112. Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, 2001.
- [27] Margaret S. Geroch. Motion capture for the rest of us. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 19(3):157–164, 2004. ISSN 1937-4771.
- [28] Ronald Azuma y Mark Ward. Space resection by collinearity: Mathematics behind the optical ceiling head-tracker. Informe técnico, Chapel Hill, NC, USA, 1991.
- [29] Roland Kehl y Luc Van Gool. Markerless tracking of complex human motions from multiple views. *Comput. Vis. Image Underst.*, 104(2):190–209, 2006. ISSN 1077-3142. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2006.07.010>.

- [30] Daniel Roetenberg. *Inertial and magnetic sensing of human motion*. Tesis Doctoral, Enschede, May 2006.
- [31] Polhemus. *AC & Pulsed DC Motion Trackers*, May. 2006.
- [32] Measurand. <http://www.motion-capture-system.com/>. Último acceso el 15 de marzo de 2010.
- [33] Lawrence G. Roberts. The lincoln wand. En *AFIPS '66 (Fall): Proceedings of the November 7-10, 1966, fall joint computer conference*, páginas 223–227. ACM, New York, NY, USA, 1966. doi:<http://doi.acm.org/10.1145/1464291.1464317>.
- [34] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. En *AFIPS '68 (Fall, part I): Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall joint computer conference, part I*, páginas 757–764. ACM, New York, NY, USA, 1968. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1476589.1476686>.
- [35] Hugh L. Applewhite. A new ultrasonic positioning principle yielding pseudo-absolute location. En *VRST '94: Proceedings of the conference on Virtual reality software and technology*, páginas 175–183. World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, USA, 1994. ISBN 981-02-1867-2.
- [36] OptiTrack. <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>. Último acceso el 2 de febrero de 2010.
- [37] Vicon. <http://www.vicon.com/>. Último acceso el 3 de marzo de 2010.
- [38] WorldViz. <http://www.worldviz.com/>. Último acceso el 3 de marzo de 2010.
- [39] Ascension Technology Corporation. <http://www.ascension-tech.com/>. Último acceso el 1 de febrero de 2010.
- [40] 3rdTech. <http://www.3rdtech.com/>. Último acceso el 3 de marzo de 2010.
- [41] Organic Motion. <http://www.organicmotion.com/>. Último acceso el 2 de febrero de 2010.
- [42] Mova. <http://www.mova.com/>. Último acceso el 8 de marzo de 2010.
- [43] Image Metrics. <http://www.image-metrics.com/>. Último acceso el 9 de marzo de 2010.
- [44] Chris Bregler. Motion capture technology for entertainment. *IEEE Signal Processing Magazine*, páginas 156–160, November 2007.

-
- [45] Polhemus. <http://www.polhemus.com/>. Último acceso el 3 de febrero de 2010.
- [46] Sixense. <http://sixense.com/>. Último acceso el 2 de marzo de 2010.
- [47] Animazoo. <http://www.animazoo.com/>. Último acceso el 25 de febrero de 2010.
- [48] InterSense Inc. <http://www.intersense.com/>. Último acceso el 22 de febrero de 2010.
- [49] Xsens. <http://www.xsens.com/>. Último acceso el 23 de febrero de 2010.
- [50] Trivisio. <http://www.trivisio.com/>. Último acceso el 23 de febrero de 2010.
- [51] Wii at Nintendo. <http://www.nintendo.com/wii>. Último acceso el 26 de febrero de 2010.
- [52] Analog Devices, Inc. *ADXL330 Data Sheet*, 2007. <http://www.analog.com/en/sensors/inertial-sensors/adxl330/products/product.html>.
- [53] Francisco Javier Muros Ponce, J. A. Vicaria Flores y José Maestre Torreblanca. Aplicaciones del controlador Wiimote para personas con discapacidad. En *Comunicaciones de las XXX Jornadas de Automática (JA2009)*. Sep. 2009.
- [54] Sony Computer Entertainment (Press Release). *Motion Controller for PlayStation 3 to become available worldwide in fall 2010*. <http://scei.co.jp/corporate/release/100120e.html>. Último acceso el 2 de marzo de 2010.
- [55] Hexamite. <http://www.hexamite.com/>. Último acceso el 15 de marzo de 2010.
- [56] Logitech. <http://www.logitech.com/>. Último acceso el 15 de marzo de 2010.
- [57] Enrique J. Gómez, César Cáceres y Eva Huelmo. *Análisis de requisitos y arquitectura de un sistema de telerrehabilitación*, capítulo 8, páginas 79–90. Análisis del estado actual de los servicios de telemedicina enfocado a evaluar la viabilidad de un programa de telerrehabilitación en pacientes con una gran discapacidad de origen neurológico. Informes, Estudios e Investigación 2007 – Ministerio de Sanidad y Consumo, 2006.
- [58] Johnny Chung Lee. Hacking the nintendo wii remote. *IEEE Pervasive Computing*, 7(3):39–45, 2008. ISSN 1536-1268. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2008.53>.
- [59] WiiBrew. <http://wiibrew.org/>. Último acceso el 2 de mayo de 2010.

- [60] Broadcom. BCM2042 – Advanced wireless keyboard/mouse Bluetooth solution. <http://www.broadcom.com>. Último acceso el 1 de julio de 2010.
- [61] Craig Ranta y Steve McGowan. *Human Interface Device (HID) Profile*, 2003. Version 1.0.
- [62] PaloWireless. <http://www.palowireless.com/>. Último acceso el 12 de mayo de 2010.
- [63] Ian F. Rickard y James E. Davis. Self-calibrating optical object tracking using wii remotes. *Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications X, Proc. SPIE*, 7249, 2009.
- [64] STMicroelectronics. *M24C32-W, M24C32-R, M24C32-F – 32 Kbit serial I2C bus EEPROM*, diciembre 2009.
- [65] InvenSense. IDG-650 integrated dual-axis gyroscope. <http://invensense.com/mems/gyro/idg650.html>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [66] Epson Toyocom. XV-3500 ultra small vibration gyro sensor (angular rate sensor). <http://www.epsontoyocom.co.jp/english/product/Sensor/set01/xv3500cb/index.html>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [67] WiiC. <http://sourceforge.net/projects/wiic/>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [68] WiimoteLib. <http://wiimotelib.codeplex.com/>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [69] WiiYourself! <http://wiityourself.gl.tter.org/>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [70] fWIIne. <http://sourceforge.net/projects/fwiine/>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [71] Torben Schou y Henry J. Gardner. A wii remote, a game engine, five sensor bars and a virtual reality theatre. En *OZCHI '07: Proceedings of the 19th Australasian conference on Computer-Human Interaction*, páginas 231–234. ACM, New York, NY, USA, 2007. ISBN 978-1-59593-872-5. doi:<http://doi.acm.org/10.1145/1324892.1324941>.

- [72] Odest Chadwicke Jenkins, Daniel H. Grollman, Jonas N. Schwertfeger y Theodora R. Hinkle. Wiimote interfaces for lifelong robot learning micah lapping- carr, 2008.
- [73] Lee E F Graves, Nicola D Ridgers y Gareth Stratton.
- [74] Javier Martín-Moreno, Daniel Ruiz-Fernández, Antonio Soriano-Payá y Vicente Jesús Berenguer-Miralles. Monitoring 3d movements for the rehabilitation of joints in physiotherapy. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2008:4836–9, 2008. ISSN 1557-170X.
- [75] M.S. Keir, C.E. Hann, J.G. Chase y X.Q. Chen. Accelerometer-based orientation sensing for head tracking in ar and robotics. *2nd International Conference on Sensing Technology (ICST 2007)*, 2007.
- [76] InvenSense. Gyroscopes and accelerometers compared. <http://www.youtube.com/watch?v=xLS19MfqC3U>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [77] Giant Bomb. Motion controls and you. Part 1: waggle! <http://www.giantbomb.com/forums/general-discussion/30/motion-controls-and-you-part-1-waggle/389213/>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [78] Brian Peek. How to calibrate a Wiimote. <http://www.brianpeek.com/forums/t/845.aspx>. Último acceso el 29 de julio de 2010.
- [79] Christopher J. Fisher. Using an accelerometer for inclination sensing. Informe técnico, 2010. http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/AN-1057.pdf. Último acceso el 26 de junio de 2010.
- [80] Matthias Rehm, Nikolaus Bee y Elisabeth André. Wave like an egyptian — accelerometer based gesture recognition for culture specific interactions. En *Proceedings of HCI 2008 Culture, Creativity, Interaction*. 2008.
- [81] Geeks with blogs. XNA tip: Changing the frequency for the Update() and Draw() methods in your game. <http://geekswithblogs.net/Sharpoverride/archive/2009/08/08/xna-tip-changing-the-frequency-for-the-update-and-draw.aspx>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [82] Manav Kataria, Vinu Bhaskar, Abhishek Sharma y Mizan Abraha. Accelerometer mouse. air-mouse.googlecode.com/files/Air-Mouse%20Report.pdf. Último acceso el 27 de junio de 2010.

- [83] Ezquiel Pozzo. Un modelo básico: Integrando ecuaciones de movimiento con el método de Euler. <http://ezequielpozzo.blogspot.com/2009/12/un-modelo-basico-integrando-ecuaciones.html>. Último acceso el 4 de julio de 2010.
- [84] Steven W. Smith. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 1997.
- [85] T. Sakaguchi, T. Kanamori, H. Katayose, K. Sato y S. Inokuchi. Human motion capture by integrating gyroscopes and accelerometers. páginas 470–475. 1996.
- [86] Ashutosh Saxena, Gaurav Gupta, Vadim Gerasimov y Sébastien Ourselin. In use parameter estimation of inertial sensors by detecting multilevel quasi-static states. *KES 2005, LNAI 3684*, páginas 595–601, 2005.
- [87] M.S. Keir, C.E. Hann, J.G. Chase y X.Q. Chen. A new approach to accelerometer-based head tracking for augmented reality and other applications. En *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, páginas 603–608. 2007.
- [88] Faraz M. Mirzaei y Stergios I. Roumeliotis. A Kalman filter-based algorithm for IMU-camera calibration. En *in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, páginas 2427–2434. 2007.
- [89] Wilmar Hernandez. Improving the response of an accelerometer by using optimal filtering. 2001.
- [90] H.J. Luinge y P.H. Veltink. Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 43(2):273–282, 2005.
- [91] Edgar Kraft. A quaternion-based unscented kalman filter for orientation tracking. En *Proceedings of the Sixth International Conference on Information Fusion*, tomo 1, páginas 47–54. 2003.
- [92] Lin Chai Khoi. An adaptive estimator for registration in augmented reality, 1999.
- [93] Rienk M.A. van der Slikke Miranda C. Boonstra and, Noël L.W. Keijsers, Rob C. van Lummel, Maarten C. de Waal Malefijt y Nico Verdonschot. The accuracy of measuring the kinematics of rising from a chair with accelerometers and gyroscopes. *Journal of Biomechanics*, 39:354–358, 2006.