



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

**Aplicaciones de la realidad virtual y
aumentada para la asistencia en medicina**

Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación

Presentada por:

José Negrillo Cárdenas

Dirigida por:

Francisco R. Feito Higuera

J. Roberto Jiménez Pérez

Jaén, septiembre de 2020

D. Francisco Ramón Feito Higuera, Catedrático de Universidad y **D. Juan Roberto Jiménez Pérez**, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Informática de la Universidad de Jaén,

INFORMAN:

Que la presente memoria, titulada **Aplicaciones de la realidad virtual y aumentada para la asistencia en medicina: Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación**, ha sido realizada por **D. José Negrillo Cárdenas** bajo su supervisión dentro del Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información y Comunicación para optar al grado de doctor.

Para su evaluación, esta memoria se presenta como un conjunto de trabajos publicados, acogiendo a lo establecido en el artículo 25.2 del *Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén*, aprobado en febrero de 2012 y modificado en febrero de 2019.

Jaén, 10 de marzo de 2021

Fdo.: Francisco Ramón Feito Higuera
Tutor y Director

Fdo.: Juan Roberto Jiménez Pérez
Director

Fdo.: José Negrillo Cárdenas
Doctorando

*A mi familia. La familia unida jamás será vencida.
Os quiero.*

Agradecimientos

Muchas personas han formado parte de forma directa o indirecta en la culminación de este proyecto, el mayor que he tenido que realizar hasta la fecha y que ha supuesto una gran cantidad de retos que en mi vida pensaría que pudieran ocurrir. En este tiempo, he tenido tiempo de descubrirme a mí mismo y encontrar mi camino y quiero agradecer con estas líneas a las personas que han contribuido a ello.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores Paco y Roberto el aguantarme estos años.

A Paco, por hacerme un hueco entre sus filas, apoyarme y darme el empujón para hacer un doctorado cuando yo aún no estaba muy convencido de ello. Han sido unos años duros pero que al final han tenido su recompensa.

A Roberto, la persona a la que probablemente más dolores de cabeza le he provocado, sobre todo por las visitas improvisadas a su despacho con la frase “Roberto, tengo dudas”. Esta tesis no sería posible sin esas interminables horas en tu despacho discutiendo qué poner en cada párrafo para que el artículo quedara perfecto. Lo que he sacado en claro es que si este agradecimiento lo leyera un revisor diría “Please provide a citation or proof confirming this claim”.

A mis padres, Pepe y Juani, por estar ahí cuando más lo necesitaba y por creer en mí siempre. No olvidar a mi *tata* que, pese a estar lejos, también me ha servido como apoyo, incluso en partes técnicas de este documento, como pueden ser, dudas sobre medicina. Como ya he dicho antes, la familia unida jamás será vencida.

A Sandra, que con su amor me ha llenado cada día y me ha dado fuerzas cuando aparecían las dudas existenciales y para seguir dando lo máximo con este trabajo. También agradecerle las revisiones ortográficas y gramaticales que ha hecho de esta memoria.

A mis compañeros del A3-102 y A3-103, Dani, Adrián, José Luis V., José Luis F., Juanma, Ángel y otros muchos por estar ahí en las trincheras disputando sus propias batallas, que se disipaban cuando hacíamos el gesto de irnos a tomar café o nos comíamos unos volcanes. Quiero hacer especial mención a Alejandro. Sin él creo

que habría sido imposible llegar donde he llegado, siendo otra de las personas que probablemente haya tenido pesadillas conmigo. De estos años, más que un compañero, me llevo un amigo.

Agradecer también al resto de miembros del Grupo de Gráficos y Geomática de Jaén que, ya sea con su equipo o su esfuerzo personal, han colaborado en esta tesis. Quiero hacer mención de Rafa, que desde que hice mi Trabajo de Fin de Máster con él, siempre ha estado ahí como un asesor externo a la tesis, dándome sabios consejos.

Gracias a Alberto y Hermes, cirujanos del Complejo Hospitalario de Jaén. Ellos han aportado las ideas y el asesoramiento médico que han dado lugar a esta tesis.

Agradecer, por último, a la Universidad de Aveiro y a Joaquim Madeira, por aceptar mi estancia en su centro. Aunque la estancia tuvo que recortarse por la crisis sanitaria de la Covid-19, me recibieron con los brazos abiertos.

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Universidades, mediante un contrato predoctoral F.P.U. (Ref. FPU16/01439) y parcialmente por los proyectos de investigación DPI2015-65123-R y TIN2017-84 96 8-R.

GRACIAS A TODOS LOS QUE HABÉIS FORMADO PARTE

Resumen

La realidad virtual y la realidad aumentada se han usado para ayudar y mejorar la capacidad humana desde hace años en múltiples campos, tanto personales, como profesionales. Cabe destacar el ámbito médico que, desde el siglo pasado, se ha beneficiado de ellas, permitiendo introducir su uso en procedimientos como el diagnóstico, asistencia, rehabilitación o tratamiento. Entre otros, su principal objetivo se centra en aumentar la seguridad del paciente y disminuir el tiempo de tratamiento y recuperación. Dada la continua evolución de la medicina hacia tratamientos mínimamente invasivos, cada vez la informática está más presente (en este caso la realidad virtual y aumentada), ya que es una poderosa ayuda para mostrar información adicional y ayudar a comprender en todo momento el estado interno del paciente.

En esta tesis se ha hecho hincapié en procesos relacionados con cirugía ortopédica y traumatología, especialmente en la reducción de fracturas óseas. En este ámbito, la realidad aumentada permite asistir durante la cirugía, ya que se puede introducir información útil en el campo de visión del cirujano en tiempo real. Por otra parte, la realidad virtual se postula como una herramienta fiable para tareas fuera del quirófano que ayuden a los profesionales tanto en la planificación de tratamientos e intervenciones. Además, los propios pacientes pueden emplear estas herramientas para realizar ciertas terapias y/o ejercicios. En esta tesis se proponen modelos de representación del cuerpo humano compatibles con los nuevos requerimientos de la realidad virtual y aumentada. Además, se proponen sistemas centrados en el especialista (entrenamiento médico) y en el paciente (tratamientos y herramientas diagnósticas).

Abstract

Virtual reality and augmented reality have been employed to help and improve human capabilities for years in many professional and personal fields. Medicine has benefited from them since the last century, by allowing to introduce these technologies in procedures such as diagnosis, assistance, rehabilitation or treatment, among others. Its main objective is focused on increasing patient safety and reducing recovery time. The continuous evolution of medicine towards minimally invasive treatments, the presence of computer science is increasing, virtual and augmented reality in this case, as it represents a powerful aid to display additional information and help to understand the internal state of a patient in real time.

This thesis focuses on processes related to orthopedic and trauma surgery, with special emphasis on bone fracture reduction. In this field, augmented reality allows to assist during surgery, since it introduces additional information to the surgeon's perspective. On the other side, virtual reality represents a reliable tool to assist professionals outside the operating room for treatment and planning interventions. In addition, patients can employ these tools to perform certain therapies and/or exercises. This thesis proposes novel 3D model representations for the human body adapted to the new requirements of virtual and augmented reality. Moreover, we propose systems centered on specialists (medical training and assistance) and patients (treatments and diagnostic tools).

Índice

Índice.....	xv
Índice de figuras.....	xix
Introducción.....	1
Conceptos teóricos y antecedentes.....	5
1. Realidad virtual y realidad aumentada.....	5
1.1. Mecanismos de interacción.....	6
1.2. Tecnologías de visualización.....	8
1.3. Limitaciones de la tecnología y posibles soluciones.....	10
2. Aplicaciones de la realidad virtual y aumentada en medicina.....	11
2.1. Tratamiento y rehabilitación.....	11
2.2. Entrenamiento.....	12
2.3. Asistencia durante la cirugía.....	13
2.4. Sistemas colaborativos y telemedicina.....	13
2.5. Cirugía ortopédica y traumatológica.....	14
3. Problemas abiertos de la RV y RA en medicina.....	15
4. Reducción mínimamente invasiva de fracturas de húmero.....	16
4.1. Anatomía del húmero.....	17
4.2. Etiquetado y análisis de reducción de fracturas.....	18
5. Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación.....	20
5.1. Trastornos relacionados con el equilibrio.....	20
5.2. Dispositivos tradicionales.....	21
5.3. La realidad virtual como herramienta clínica.....	23
Discusión de los resultados.....	25

1. Contribución de la RV y RA en cirugía ortopédica y traumatología	25
1.1. Antes de la operación	26
1.2. Durante la operación.....	28
1.3. Después de la operación.....	30
2. Cirugía mínimamente invasiva de reducción de fracturas (MIPO)	31
3. Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación de trastornos del equilibrio	32
Conclusiones y trabajo futuro	33
1. Trabajo futuro.....	34
2. Publicaciones adicionales	35
Publicaciones asociadas.....	37
1. The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation.....	38
2. Automatic detection of landmarks for the analysis of a reduction of supracondylar fractures of the humerus.....	50
3. A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-specific supracondylar humerus fractures: a preclinical study	60
4. A system for the measurement of the subjective visual vertical using a virtual reality device.....	73
English version	85
1. Introduction.....	85
2. Background.....	86
2.1. Virtual and augmented reality	87
2.2. Applications of VR and AR in medicine	91
2.3. Open problems of VR and AR in medicine	96
2.4. Minimally invasive reduction of humerus fractures.....	96
2.5. Diagnosis, treatment and rehabilitation	100
3. Discussion of results	103
3.1. Contribution of VR and AR to O&T surgery.....	104
3.2. Minimally invasive fracture reduction surgery (MIPO).....	109
3.3. Diagnosis, treatment and rehabilitation exercises of disorders related to body balance.....	110

4. Conclusions and future work.....	110
4.1. Future work.....	111
4.2. Additional publications.....	111
Bibliografia.....	113

Índice de figuras

Figura 1. Representación simplificada de la continuidad realidad-virtualidad.....	6
Figura 2. Ejemplos de dispositivos hápticos.....	8
Figura 3. De izquierda a derecha: HTC Vive ®, Microsoft HoloLens ® y Google Glass ®.....	9
Figura 4. Visualización de órganos a través de la piel usando realidad aumentada [53, 54].	14
Figura 5. Diagrama de las etapas y tareas a realizar en una cirugía de reducción de fracturas.	15
Figura 6. Anatomía del húmero.....	18
Figura 7. Enfoques clásicos para la medición de la visual vertical subjetiva	22
Figura 8. Dispositivos clásicos para la estimulación optocinética.....	24
Figura 9. Gráficos de la situación de la RV y RA en tareas previas a la cirugía.	27
Figura 10. Gráficos de la situación de la RV y RA en tareas durante la cirugía.	29
Figura 11. Gráficos de la situación de la RV y RA en tareas después de la cirugía.	30
Figure 1. Simplified version of the reality-virtuality continuum.	87
Figure 2. Examples of haptic devices	88
Figure 3. From left to right: HTC Vive ©, Microsoft HoloLens © and Google Glass ©.....	90
Figure 4. Superimposing virtual organs on the patient skin [53, 54].....	94
Figure 5. Flowchart of the tasks performed in bone fracture reduction surgery.	95
Figure 6. Anatomy of the humerus.....	98
Figure 7. Classical paradigms to measure the subjective visual vertical.....	102
Figure 8. Classical paradigms for optokinetic stimulation	103
Figure 9. Plots regarding the current state of VR and AR in tasks before surgery.....	105
Figure 10. Plots regarding the current state of VR and AR in tasks during surgery.....	107
Figure 11. Plots regarding the current state of VR and AR in tasks after surgery.....	108

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de la historia, la medicina siempre ha sido una de las áreas más importantes de la investigación. La evolución de la informática en los años 70 permitió establecer una fuerte alianza con ella para atajar nuevos retos clínicos, principalmente con la aparición de la imagen médica tridimensional: tomografía computarizada (CT o TAC en español) o resonancia magnética [1, 2]. Actualmente, el uso de estas tecnologías en medicina tiene múltiples objetivos. Entre otros:

- Mejorar el diagnóstico.
- Asistir en el tratamiento de patologías complejas.
- Minimizar el tiempo de recuperación después de una intervención quirúrgica, proporcionando vías para planificar y estudiar cuidadosamente cada paso a realizar en el procedimiento correspondiente [3].

La realidad virtual y aumentada proporcionan herramientas adicionales para afianzar la colaboración entre la informática y la medicina, permitiendo realizar tareas de forma más rápida y segura. A finales del siglo XX aparecieron los primeros prototipos de sistemas RV/RA muy limitados en cuanto al hardware. Los nuevos avances en interfaces de usuario, dispositivos móviles, conexiones de red, entre otros, han permitido que, tanto realidad virtual como aumentada, estén más presentes en nuestras vidas. Si bien inicialmente estos sistemas se centraron en mejorar el estilo de vida de las personas mediante aplicaciones cotidianas y de entretenimiento, en la actualidad estas aplicaciones van más allá: turismo, navegación, educación, modelado geométrico, asistentes para la industria, usos militares, etc., [4, 5].

La motivación principal de esta investigación es el estudio de nuevos avances en relación con las técnicas de realidad virtual y aumentada que permitan el desarrollo de nuevas aplicaciones en el campo de la medicina. Es por ello que se plantea la siguiente hipótesis inicial:

“Es posible desarrollar nuevas aplicaciones basadas en realidad virtual y/o aumentada para la asistencia al personal sanitario antes, durante y después de la operación, que ayuden a reducir tanto el tiempo de cirugía, como los riesgos asociados al paciente, reduciendo así, el tiempo de recuperación.”

En base a la misma, se plantean una serie de objetivos principales:

1. Estudiar las etapas de una operación típica en el contexto de la cirugía ortopédica y traumatología y la contribución de la RV/RA a las mismas, concretamente, en la reducción de fracturas quirúrgica.
2. Desarrollar nuevos sistemas de representación y medidas digitales para los modelos humanos, así como para su visualización e interacción en entornos de realidad virtual y aumentada.
3. Desarrollar aplicaciones que pongan en práctica los modelos generados, así como, que cubran tareas abiertas en el objetivo 1.

En virtud con lo establecido en el artículo 25.2 de la normativa vigente para los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén del programa establecido en el RD.99/2011, esta memoria se presenta como un conjunto de artículos publicados por el doctorando. Las publicaciones se corresponden con el núcleo de la tesis, y están publicadas en revistas internacionales indexadas en la base de datos *Web of Science* (WoS) y pertenecientes al informe anual *Journal Citation Reports* (JCR).

El presente documento se estructura de la siguiente forma:

- Capítulo 2. Se presentan los conceptos teóricos que se van a tratar en esta investigación, así como el estado del arte relativo a la tesis en su conjunto. Primero se hará una definición de los términos *realidad virtual* y *realidad aumentada*, así como su base tecnológica. A continuación, se hará un recorrido por las aplicaciones de las mismas en el campo de la medicina, estudiando, además, los problemas abiertos en este ámbito. Se presenta un caso concreto de cirugía, la mínimamente invasiva de fracturas óseas. Por último, se presenta la aportación específica de la realidad virtual en diagnóstico, tratamiento y rehabilitación de trastornos relacionados con el equilibrio.
- Capítulo 3. Se presenta un resumen de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación realizada para alcanzar los objetivos planteados anteriormente y se hace una breve discusión de los mismos.
- Capítulo 4. Se presentan las conclusiones y las líneas de trabajo futuro de la tesis doctoral.

- Capítulo 5. Se presentan las publicaciones originales que forman parte del compendio.
- Capítulo 6. Documentación en inglés para la obtención de la Mención Internacional de doctorado, de acuerdo al artículo 36 del Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén.

Capítulo 2

Conceptos teóricos y antecedentes

En este capítulo se detallan los conceptos teóricos y antecedentes para contextualizar el trabajo realizado a lo largo de la presente tesis. Para ello, primero se explican tanto la realidad virtual, como la realidad aumentada, así como sus detalles técnicos. Después, se realiza un análisis general de las aplicaciones de ambas en el área de la medicina, haciendo especial énfasis en la cirugía ortopédica y traumatología, detallando la problemática y posibles soluciones a la implantación de estas tecnologías en dicho ámbito. Por último, se introducirán dos aplicaciones específicas de la realidad virtual, que son objeto de trabajo de esta tesis.

1. Realidad virtual y realidad aumentada

La realidad virtual (RV) es la creación de un entorno software, presentado como si del mundo real se tratase. Su principal objetivo es convencer al usuario que está en físicamente en un lugar simulado *engañando* al cerebro [5]. Los estímulos que más contribuyen a alcanzar la inmersión son los auditivos y visuales. Los visores de realidad virtual (Head Mounted Displays, HMD), detectores de movimiento, mandos y un ordenador son los principales elementos que permiten crear esta ilusión. Tradicionalmente, el término realidad virtual se ha venido refiriendo a cualquier entorno tridimensional que pudiera ser explorado con un ordenador personal. Sin embargo, actualmente, cuando se hace referencia a este término, es inevitable pensar en entornos inmersivos.

Por otra parte, la realidad aumentada (RA) corresponde con la visualización del mundo real *aumentada* con información generada por ordenador. El usuario ve enriquecida la experiencia en el mundo real mediante la adición de nueva información. Por ello, mientras que la RV introduce al usuario en un mundo puramente artificial, la RA visualiza el mundo real añadiendo información sintética. Ambas tecnologías tienen múltiples aspectos en común e incluso, en

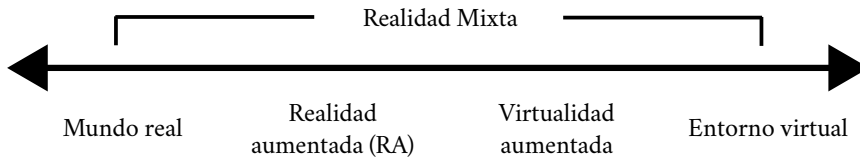


Figura 1. Representación simplificada de la continuidad realidad-virtualidad

muchos casos, se basan en dispositivos similares, teniendo como objetivo el proporcionar al usuario una experiencia mejorada o enriquecida.

Milgram et al. [6] establecieron la realidad mixta como el espacio comprendido entre la realidad virtual y el mundo real, donde objetos reales y virtuales son mostrados simultáneamente, definiendo así una continuidad realidad-virtualidad (véase Figura 1). Sin embargo, en ciertos ámbitos como la medicina, cualquier sistema que no represente un entorno puramente virtual se considera como realidad aumentada. Por ello, ya que la medicina será objeto de estudio en esta tesis, esta terminología se empleará a lo largo de la misma.

En este apartado se detallarán una serie de aspectos relacionados con la tecnología de realidad virtual y aumentada desde un punto de vista general. Primero se analizarán los mecanismos de interacción de estos sistemas. A continuación, las tecnologías de visualización. Por último, se expondrán las principales limitaciones encontradas, con sus posibles soluciones.

1.1. Mecanismos de interacción

La interacción representa la forma mediante la que las personas se comunican con los ordenadores. En otras palabras, los usuarios pueden modificar el sistema o recibir respuesta del mismo. Dependiendo de la necesidad o no de usar dispositivos para manipular el sistema, podemos distinguir dos paradigmas: interfaz de usuario natural o interfaz basada en dispositivos.

1.1.1. Interfaz de usuario natural

Las interfaces de usuario naturales (Natural User Interfaces, NUI), se definen como aquellas que permiten interactuar con un sistema sin la necesidad de utilizar dispositivos externos y sin requerir un entrenamiento previo [7]. Muchas de estas interfaces están basadas en comandos de voz o gestos [8, 9].

En el caso de los entornos virtuales tridimensionales las interacciones más básicas están relacionadas con la selección, posicionamiento y orientación de los objetos

de la escena [10]. En estos casos, después de seleccionar, la retroalimentación al usuario se lleva a cabo mediante el resalte de los mismos, reproducción de sonidos y aplicación de vibraciones. Mediante el uso de NUI el movimiento de la cámara se puede relacionar directamente con la orientación del dispositivo como, por ejemplo, la cabeza en el caso de sistemas basados en HMD o la posición/orientación del dispositivo en la RA móvil. Además de la interacción básica, se pueden encontrar acciones más complejas como el escalado o la asignación de colores o materiales. Mediante la combinación de gestos simples con otros más sofisticados, como menús radiales [11], la experiencia de usuario se puede ir enriqueciendo.

Una correcta implementación de las NUI es crucial en ciertos escenarios como la cirugía para evitar el uso de dispositivos adicionales que puedan entorpecer el correcto desarrollo del procedimiento habitual.

1.1.2. Interfaz basada en dispositivos

Las interfaces basadas en dispositivos se pueden definir como las que necesitan de aparatos externos adicionales para aplicar las acciones del usuario al sistema. La interacción en entornos virtuales se ha venido realizando tradicionalmente con dispositivos bidimensionales, como pueden ser un teclado o ratón. En la actualidad, la aparición de nuevos dispositivos con mayores grados de libertad (p.ej, dispositivos hápticos, Figura 2) ha propiciado una mejora en la experiencia de usuario en entornos inmersivos. El propósito de un háptico es la recreación del sentido del tacto en un ordenador. Se consigue mediante la aplicación de fuerzas, vibraciones o movimientos. Estos dispositivos se pueden clasificar dependiendo de la naturaleza de la respuesta: fuerzas o táctil [12, 13].

Por un lado, los dispositivos que se basan en la aplicación de fuerzas hacen un seguimiento de uno o múltiples puntos, replicando los movimientos que hace el usuario en el mundo virtual. Se aplica como respuesta una fuerza o torsión [13]. Los grados de libertad representan el número de direcciones o rotaciones que un dispositivo es capaz de realizar. La mayoría proporcionan tres (movimientos en todas direcciones) aunque se puede aumentar hasta cinco o seis añadiendo rotaciones.

Por otra parte, los dispositivos táctiles se basan en receptores mecánicos que aplican reacciones en la piel, como pueden ser cambios de temperatura, químicos o ciertos tipos de dolor. Los más comunes son los guantes táctiles, que aplican fuerzas y vibraciones en los dedos. Proporcionan una sensación de agarre, empuje o movimiento de objetos en entornos virtuales [14–16]. Para conseguir añadir este tipo de sensaciones a los dispositivos es necesario añadir propiedades físicas



Figura 2. Ejemplos de dispositivos hápticos

a los objetos virtuales: dureza, masa, flexibilidad, resistencia, temperatura, etc. Para representarlas se suelen usar modelos volumétricos, análisis de elementos finitos o mallas tetraédricas [17].

Por último, existen dispositivos más simples diseñados con otros propósitos para interactuar en estos entornos. Por ejemplo, los dispositivos móviles se presentan como una opción barata en la realidad virtual y aumentada. Se recomienda consultar el trabajo de Telkenaroglu y Capin [18] para consultar los retos que presentan. En el caso de la medicina, estos dispositivos pueden usarse, como por ejemplo en traumatología, como analizaron Jiménez-Pérez et al. [19]. Además, existen dispositivos más clásicos, como los mandos de videoconsolas que pueden ser usados en casos específicos, sobre todo, en rehabilitación. Por ejemplo, McPhail et al. [20] propusieron un sistema de rehabilitación del tren inferior usando un mando de la consola Nintendo Wii™.

1.2. Tecnologías de visualización

En el apartado anterior se ha estudiado la parte de la interacción relacionada con la entrada de información al sistema y su respuesta física. Sin embargo, la interacción visual representa el medio más simple de mostrar información entre los usuarios y los ordenadores. Un dispositivo de visualización es capaz de mostrar información y presentar el estado actual del sistema. En el caso de los entornos virtuales, las pantallas pueden ir desde las clásicas hasta más sofisticadas como HMD. Los fabricantes son conscientes de los nuevos requisitos que presentan tanto la RV como la RA y continuamente desarrollan nuevas mejoras. Google Glass (Google, Mountain View, USA), Microsoft HoloLens (Microsoft, Redmond, USA), HTC Vive (HTC, Taoyuan, China), entre muchas otras, son ejemplos de este tipo de dispositivos (Figura 3).



Figura 3. De izquierda a derecha: HTC Vive[®], Microsoft HoloLens[®] y Google Glass[®]

La realidad virtual necesita de una visión estéreo y las diferencias cualitativas entre dispositivos radican principalmente en la calidad del panel que monten. En cuanto a la realidad aumentada, existen dos tipos de enfoques: visualización de vídeo y pantallas ópticas transparentes [4].

Los dispositivos basados en vídeo capturan las imágenes mediante una cámara y la muestran en una pantalla, a las cuales se le superpone información virtual. Un ejemplo de estos sistemas son los basados en dispositivos móviles. Este enfoque facilita realizar la correspondencia entre el mundo real y los elementos generados por ordenador. Sin embargo, existen una serie de inconvenientes:

- Es complicado obtener una fluidez natural ya que el usuario observa una pantalla en lugar del mundo real.
- En caso de fallo del sistema el usuario quedaría *ciego* hasta que no se retiren las gafas. Esto es especialmente peligroso cuando se usa este enfoque durante situaciones críticas (como por ejemplo durante la cirugía).

Por otro lado, los dispositivos con pantallas ópticas transparentes difieren de los anteriores en que el usuario observa el mundo real a través de lentes, espejos o proyecciones a las que se le añade la información virtual. Se puede observar que el usuario mira directamente al exterior, sin pasar por una pantalla. Google Glass y Microsoft HoloLens emplean este enfoque. Por ello, se observan una serie de ventajas al usar este tipo de dispositivos:

- Se tiene una fluidez natural de la imagen real ya que el usuario la observa directamente.
- No se limita la visión en caso de que el sistema falle, ya que se seguiría viendo el mundo real.

La principal desventaja de los dispositivos ópticos es la complejidad de hacer corresponder exactamente la información virtual con el flujo óptico, por ello, en ocasiones es necesaria una calibración preliminar [21].

Existen otros sistemas que no están basados en HMD a nuestra disposición, como pueden ser tabletas, móviles u otro tipo de pantallas empotradas. Por ejemplo, durante cirugía mínimamente invasiva (laparoscopias o artroscopias) se pueden construir sistemas virtuales guiados por imagen para visualizar los órganos del paciente [22].

La tecnología descrita anteriormente está basada en la visualización de la información a través de una pantalla o similar. Sin embargo, hay otros enfoques como puede ser la realidad aumentada proyectada, en la cual se proyecta directamente la imagen sintética sobre la escena que se quiere aumentar [23]. Su principal problema son las oclusiones debido a que el usuario en muchas ocasiones, como en la cirugía, se coloca entre el proyector y el objeto. Los proyectores de mano surgen como una posible solución a este problema [24].

1.3. Limitaciones de la tecnología y posibles soluciones

Los sistemas de realidad virtual y aumentada tienen ciertas limitaciones, sobre todo relativas a la calidad de la experiencia inmersiva. El rendimiento es la principal de las mismas, sobre todo en RA ya que en estos sistemas se necesita, además, procesar las imágenes capturadas del mundo en tiempo real [25].

El retraso que puede aparecer en RV y RA a tasas de fotogramas por segundo bajas afecta de forma muy negativa a la experiencia, ya que el ser humano es muy sensible a los retardos visuales. Un retraso de 100 a 300 ms entre fotogramas consecutivos destruye la sensación de inmersión y debe evitarse para paliar mareos [26, 27].

Como es bien sabido, estas tecnologías suelen estar basadas en hardware móvil en su mayoría. De hecho, esto implica que el rendimiento de los sistemas RV/RA sea equivalente al de los ordenadores de sobremesa de hace aproximadamente diez años [28]. Por ello, es necesario desarrollar técnicas de optimización, como, por ejemplo, la computación en la nube o el uso de niveles de detalle, para aumentar la tasa de fotogramas por segundo en la medida de lo posible.

Por otra parte, la interacción también presenta una serie de retos. Un error muy típico en ciertos sistemas es la presentación de excesiva información al usuario. Esto provoca un efecto denominado ceguera inatencional, definida como la falta de atención a un estímulo presente en el campo visual, no estando asociado a ningún trastorno [29, 30]. La solución a estos problemas reside en reducir el número de detalles a mostrar al usuario al mínimo posible, obligando a centrar su atención en los aspectos más importantes.

2. Aplicaciones de la realidad virtual y aumentada en medicina

Actualmente, la realidad virtual y aumentada se pueden aplicar en numerosos procedimientos médicos. Representan una alternativa barata y eficiente en la mayoría de las etapas del tratamiento y para realizar ciertos procedimientos [22]. Estos sistemas se han popularizado en los últimos años, de hecho, los investigadores son conscientes de ello y existen multitud de revisiones bibliográficas enfocadas en diversos ámbitos. Se recomienda al lector su lectura para más detalles relativos a estas disciplinas:

- Li et al. [22]. Aplicaciones en medicina clínica, centrándose principalmente en la realidad virtual para el tratamiento.
- Ruikar et al. [31] y Vaughan et al. [32]. Simuladores de entrenamiento en cirugía ortopédica y traumatología, estudiando el impacto que tienen en el desarrollo de estas intervenciones.
- Escobar-Castillejos et al. [33]. El papel de los dispositivos hápticos en el desarrollo de simuladores realistas.
- Vávra et al. [34]. Realidad aumentada para el uso en cirugía general, centrándose en los sistemas de navegación quirúrgica.
- Bernhardt et al. [35]. Cirugía laparoscópica.
- Meola et al. [36]. Realidad aumentada en neurocirugía.

A continuación, se detallarán las principales aplicaciones de la RV/RA clasificadas en las siguientes categorías: tratamiento y rehabilitación, entrenamiento médico, asistencia durante la cirugía, sistemas colaborativos y telemedicina. Finalmente, se hará especial hincapié en la cirugía ortopédica y traumatológica.

2.1. Tratamiento y rehabilitación

Realidad virtual y aumentada pueden ser empleadas como instrumento en la realización de diversos tratamientos basados en la estimulación visual y determinados ejercicios de rehabilitación.

El tratamiento de enfermedades psicológicas, como fobias y trastornos emocionales, en muchas ocasiones requieren la exposición del paciente a situaciones traumáticas o fóbicas, que son las que le provocan la enfermedad. Este tipo de tratamientos se denominan terapias de exposición [37]. RV y RA permiten recrear estos escenarios (interacciones sociales, ciertos estímulos que provocan fobias, etc.) en un entorno seguro y controlado. La recreación de este tipo de situaciones mediante entornos virtuales se presenta como una solución muy

efectiva, ya que se pueden crear entornos específicos adaptados al paciente [38, 39].

Otra aplicación es el tratamiento para la gestión del dolor, en muchas ocasiones, crónico. Las unidades del dolor se encargan de tratar dolores complejos mediante el desarrollo de terapias específicas. Se suele recurrir a un especialista cuando éste se descontrola o se convierte en crónico. Hoffman et al. [40, 41] desarrollaron el primer sistema de realidad virtual con el objeto de realizar tratamientos para controlar el dolor. Se ha demostrado que los pacientes con dolores crónicos reducen sus síntomas cuando se exponen a terapias distractoras de realidad virtual [42–44].

Por último, la realidad virtual y aumentada se pueden emplear para ejercicios de rehabilitación vestibular que requieran aislamiento del entorno [45–47]. Estas últimas se verán en mayor detalle en el apartado 5 de este capítulo.

2.2. Entrenamiento

Tradicionalmente, el entrenamiento médico se ha realizado empleando cadáveres o maniqués, donde los aprendices aprenden bajo la supervisión de un profesional experimentado. Puede apreciarse que este enfoque es poco sostenible en el ámbito académico, ya que ciertos procedimientos sólo pueden realizarse una vez por espécimen, requiriéndose un gran número de cadáveres para entrenar a un conjunto de alumnos. Además, la continua evolución de la medicina motiva a los cirujanos a estudiar y entrenar nuevos abordajes y técnicas más seguras en sus intervenciones.

El uso de sistemas basados en realidad virtual y aumentada permite simular multitud de escenarios adaptados a las condiciones que sean necesarias, incluso simular patologías inusuales. Es un hecho que los cirujanos formados a través de simuladores adquieren las competencias de forma más rápida que los entrenados de forma clásica [48, 49].

Para crear sistemas de realidad virtual que representen situaciones realistas es necesario incluir el sentido del tacto en la experiencia. Esto se consigue mediante la inclusión de dispositivos hápticos que representen el instrumental médico dentro del entorno virtual y apliquen fuerzas y sensaciones a los usuarios [32, 50]. Por ello, los fabricantes son conscientes de estos requerimientos y han desarrollado múltiples sistemas para entrenar diversos tipos de intervenciones médicas como, por ejemplo, VirtaMed® o Swemac®.

Por otro lado, la realidad aumentada se está presentando como una alternativa a la realidad virtual para fines de entrenamiento. Combinando cadáveres, maniqués u órganos impresos en 3D con información digital, el entrenamiento del cirujano se ve mejorado con información extra o instrucciones [51].

2.3. Asistencia durante la cirugía

Durante la cirugía suena razonable centrarse únicamente en los sistemas basados en realidad aumentada, ya que los cirujanos interactúan con entidades tangibles en lugar de un mundo completamente sintético. Estos sistemas permiten añadir información relevante a los cirujanos durante el procedimiento en tiempo real. Se pueden mostrar instrucciones, constantes vitales o detalles de la anatomía que pudieran estar ocultos [52].

Son numerosas las intervenciones que se pueden beneficiar de la realidad aumentada. Principalmente se destacan las mínimamente invasivas, ya que los cirujanos no pueden ver los órganos internos sin instrumental específico [35, 53, 54], cirugía ortopédica y traumatológica [34], cirugía asistida por robots [55], neurocirugía [36] o incluso las intervenciones clásicas [56], como se muestra en la Figura 4.

2.4. Sistemas colaborativos y telemedicina

Existen entornos virtuales en los que se necesitan la presencia de varios actores interactuando con el mismo entorno. Los entornos colaborativos permiten la presencia de múltiples usuarios usando el mismo sistema simultáneamente. El trabajo cooperativo asistido por ordenador [57] se puede integrar en el ámbito médico en diversas situaciones, como pueden ser en el entrenamiento [58–62] o en el quirófano [63].

Los sistemas mencionados se suelen basar en la telepresencia, que consiste en la inserción de un observador remoto en una escena [64]. La telemedicina es una aplicación de este concepto en la cual se da asistencia médica usando dispositivos de telecomunicaciones. En sus inicios, la telemedicina consistía en una simple llamada telefónica al médico. Sin embargo, actualmente la asistencia puede ser más completa gracias a los avances en las comunicaciones y los dispositivos de visualización. Estos sistemas pueden emplearse como apoyo a centros de salud rurales en los que no se disponga de especialidades médicas más allá de la medicina familiar. En estos casos, un especialista equipado con un HMD puede dar instrucciones desde un hospital para la estabilización de un paciente con una urgencia muy específica [65].

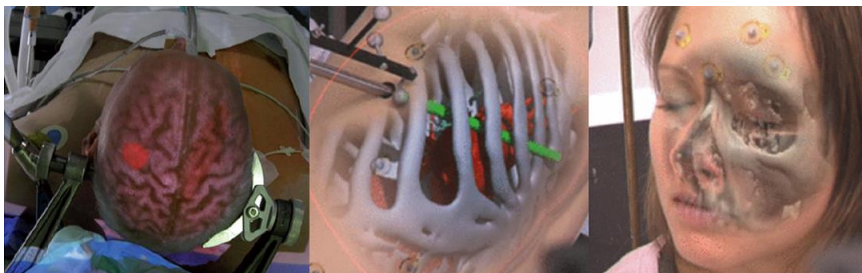


Figura 4. Visualización de órganos a través de la piel usando realidad aumentada [53, 54]

2.5. Cirugía ortopédica y traumatológica

Son numerosas las herramientas informáticas desarrolladas para la cirugía ortopédica y traumatológica. La mayoría de ellas se suelen centrar en la planificación de la reducción de fracturas [66–75]. Sin embargo, se ha detectado una carencia del uso de la realidad virtual y/o aumentada en este contexto, a diferencia de otros campos mencionados anteriormente. Por ello, en este punto se presenta un análisis de las aplicaciones actuales, estudiando las mejoras o ajustes necesarios para poder satisfacer los requisitos de la realidad virtual y aumentada que les permitan estar más presentes en este campo. Además, se presentan la utilidad, fortalezas, debilidades y una perspectiva de futuro de estas aplicaciones en el ámbito. El proceso integral de la cirugía de reducción de fracturas se detalla estudiando cada tarea a realizar, desde el diagnóstico hasta la rehabilitación.

Antes de comenzar, es necesario realizarse las siguientes preguntas: ¿Qué procedimientos se engloban en la cirugía ortopédica y traumatológica? ¿Qué es una fractura ósea? ¿En qué consiste la reducción de fracturas y en qué etapas se divide?

La cirugía ortopédica y traumatológica trata de reparar lesiones severas del apartado musculo-esquelético, provocadas en su mayoría por accidentes, que suelen requerir una acción urgente. Aunque no todas las lesiones pudieran ser mortales, afectan de forma significativa a la vida normal del paciente. Además de lesiones, la cirugía ortopédica y traumatológica se encarga del tratamiento de enfermedades relacionadas con el aparato locomotor.

Relativo a la segunda pregunta, encontramos el término *fractura ósea*. Consiste en la interrupción de la continuidad ósea y cartilaginosa debido a un traumatismo mecánico [76]. En otras palabras, es la rotura de un hueso en dos o más

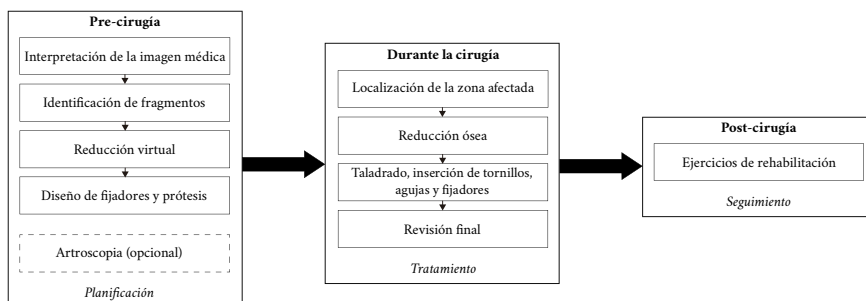


Figura 5. Diagrama de las etapas y tareas a realizar en una cirugía de reducción de fracturas.

fragmentos, debido principalmente a un impacto repentino. En ocasiones, una fractura puede producirse como resultado de una enfermedad, que provoque una inusual fragilidad del tejido óseo.

Como tratamiento a las fracturas, existe la reducción de fracturas. Consiste en la alineación de los fragmentos óseos para recuperar su posición anatómica natural y conseguir la máxima recuperación funcional. Dependiendo del tipo de fractura y complejidad, es posible que requiera una fijación con tornillos, placas o implantes [3]. Normalmente, el tratamiento de una fractura ósea que requiera cirugía puede dividirse en tres etapas: pre-cirugía, cirugía y post-cirugía (ver Figura 5). Primero, la cirugía se planifica y se estudia detalladamente. Después, se hace la intervención y su evaluación. Por último, después de la cirugía, se planifican los ejercicios de rehabilitación, se ejecutan y se hace un seguimiento de la evolución del paciente. El trabajo de investigación asociado a esta parte, en el que se detallan las tareas de cada etapa, es el siguiente:

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito, "The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation," Comput. Methods Programs Biomed., vol. 191, p. 105407, 2020.

3. Problemas abiertos de la RV y RA en medicina

A lo largo de este capítulo se ha hablado de las tendencias tanto de la realidad virtual como aumentada en medicina. Se ha hecho especial hincapié en la cirugía ortopédica y traumatológica, concretamente en la reducción de fracturas. Como conclusión se puede obtener la siguiente: La realidad aumentada es una herramienta muy útil para tareas relacionadas a la asistencia durante la cirugía, especialmente para comprender el estado de los tejidos internos durante la

operación. Además, puede servir en ocasiones como alternativa barata al entrenamiento en realidad virtual si se combina con la impresión 3D.

Entre otros, uno de los retos a los que nos podemos enfrentar es a la cirugía mínimamente invasiva de fracturas óseas. Dada su naturaleza, se requiere el uso de herramientas asistidas por ordenador que ayuden a comprender el estado interno del paciente durante la misma. Para ello se requiere una minuciosa planificación que permita llevarla a cabo sin poner en riesgo al paciente.

Por otra parte, la realidad virtual es una herramienta muy útil para tareas fuera del quirófano, sirviendo como apoyo a los profesionales de la medicina (planificación de procedimientos quirúrgicos) y como ayuda a los pacientes (ejercicios de rehabilitación y diagnóstico).

En este caso, uno de los problemas encontrados es la unificación y actualización de los sistemas de diagnóstico existentes trastornos relacionados con el equilibrio. En cierto modo, estas pruebas no han evolucionado tanto como las relacionadas con la cirugía, ya que, actualmente se vienen realizando usando dispositivos analógicos. En el apartado 5 se analizará esta problemática y se propondrán soluciones tanto diagnósticas, como de recolección y análisis de datos y seguimiento.

4. Reducción mínimamente invasiva de fracturas de húmero

Hasta ahora se ha hablado en numerosas ocasiones de la cirugía mínimamente invasiva y sus ventajas con respecto a metodologías clásicas. Este enfoque se ha ido extendiendo con el paso del tiempo a otros ámbitos, como al de la cirugía ortopédica y traumatología. Tradicionalmente se ha tratado de hacer la reducción de fracturas mediante una unión rígida de los fragmentos. Sin embargo, se ha observado con el tiempo que centrarse únicamente en reducir la movilidad de los mismos, manteniendo cierta holgura entre ellos, suele resultar finalmente en una unión más sólida, por lo que una fijación interna rígida no es absolutamente necesaria.

Gracias a lo anterior, a lo largo de los años la reducción quirúrgica de fracturas ha evolucionado hacia métodos más biológicos: los denominados osteosíntesis mínimamente invasiva (MIO). A partir de éstos han ido apareciendo otros métodos identificados como *Sistemas de Estabilización Menos Invasivos* (LISS). Son placas que contienen partes que permiten su inserción intramuscular y gracias a sus ranuras, permiten la inserción de tornillos de forma más segura. A partir de

esta técnica surgen las denominadas placas de bloqueo de compresión (LCP) que, además, se pueden usar tanto como un compresor estándar, como un fijador interno. Gracias a esto, LCP puede usarse para intervenciones mínimamente invasivas, eliminando también la necesidad de moldear de forma precisa la placa al hueso. La osteosíntesis mínimamente invasiva con placas (MIPO) introdujo el uso de nuevos tipos de LCP diseñadas para partes específicas como la tibia, el fémur y el húmero. Para más detalles relativos a esta técnica, se recomienda la lectura de [77].

4.1. Anatomía del húmero

Para estudiar las fracturas de húmero y las posibles vías de asistencia a los especialistas en distintas tareas, es preciso conocer primero la anatomía del mismo (Figura 6). El húmero es el hueso situado en el brazo que conecta el hombro y el codo. Es considerado como un *hueso largo* del cuerpo humano, por lo que está dividido en tres partes:

- Epífisis proximal. Es la parte superior del hueso, perteneciendo a la articulación glenohumeral del hombro.
- Diáfisis. Con forma cilíndrica y alargada, representa el cuerpo central. Determina la dirección del brazo.
- Epífisis distal. Corresponde con la parte baja del hueso, siendo parte del codo.

La epífisis proximal contiene principalmente la cabeza del húmero, con forma semiesférica. Existen ciertas inserciones para tendones y ligamentos como, por ejemplo, el surco o corredera bicipital, que queda flanqueado por el troquíen y el troquíter.

La parte distal tiene una serie de ranuras para adaptar el húmero al cúbito y al radio, permitiendo la flexo-extensión del codo. Principalmente son las fosas coronoidea y olecraneana, la tróclea y el cóndilo. Además, el ancho de esta articulación queda definido por el epicóndilo y la epitróclea.

Aparte de los puntos mencionados, se pueden establecer otros elementos geométricos (ejes y regiones) que ayuden en el diagnóstico o para comparar entre casos. Principalmente se puede definir el cuadrado de Müller [78], establecido para determinar la naturaleza de las fracturas en huesos largos. Se define como el cuadrado cuyo lado corresponde con la parte más ancha de cualquier epífisis. En este caso, el húmero contiene dos, localizados en las partes distal y proximal, respectivamente. Además, el eje diafisario (HSA) se define como la línea a lo largo del húmero, pasando por el centro de los canales endosteales proximal y distal

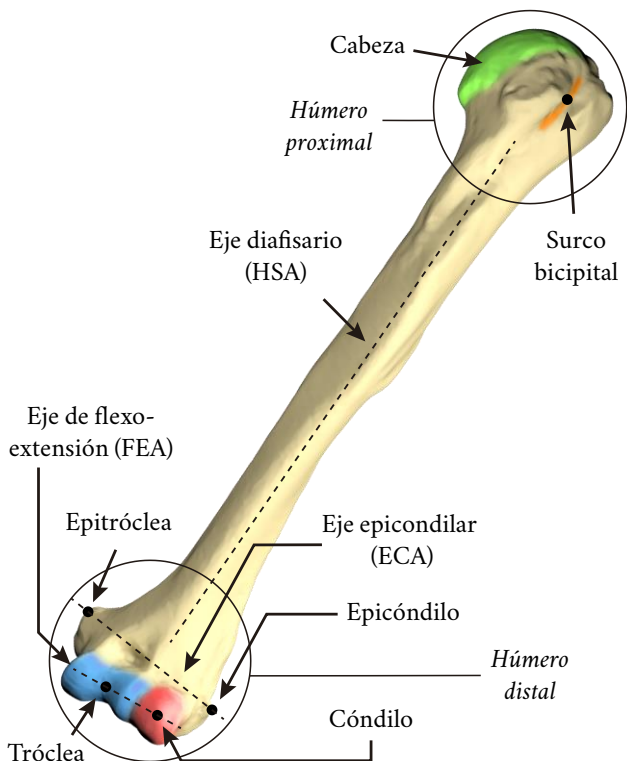


Figura 6. Anatomía del húmero

[79]. El eje epicondíleo (ECA) queda definido como la recta que une la epitroclea y el epicóndilo. Por último, la recta que une los centros del cóndilo y la tróclea define el eje de flexo-extensión del codo (FEA).

Para más detalles de la anatomía del húmero y su implicación en los grupos articulares del codo y hombro se recomienda la lectura de [80–84].

4.2. Etiquetado y análisis de reducción de fracturas

La identificación elementos anatómicos representa una parte fundamental de las aplicaciones de asistencia durante la cirugía ya que, en numerosas ocasiones, sirven como dato de entrada para ciertas herramientas. El etiquetado de elementos se ha venido haciendo de forma manual hasta ahora, siendo muy tedioso e impreciso. Es por ello que la identificación automática de tejidos es actualmente una línea de investigación prometedora. Las recientes mejoras en este ámbito permiten desarrollar herramientas sofisticadas para el diagnóstico, aprovechando la detección de características, órganos o puntos de interés [85].

En el caso de la traumatología, la identificación de características de huesos permite comprender mejor el aparato locomotor. Por ejemplo, permite estudiar más fácilmente la evolución de enfermedades o fracturas, diseñar prótesis adaptadas y desarrollar herramientas CAOS (Computer-Assisted Orthopedic Surgery). La adopción de soluciones específicas para pacientes permiten planificar intervenciones adaptadas para reducir el tiempo en el quirófano y, de este modo, mejorar la recuperación posterior [3].

Muchos de los procedimientos mencionados comienzan con una detección de puntos anatómicos, como en las articulaciones, que requieren un alineamiento preciso de los huesos que la forman para permitir un movimiento adecuado. Un ejemplo de ello son las fracturas supracondíleas de húmero. Representan el 2% de todas las fracturas en los últimos diez años, requiriendo frecuentemente reducción quirúrgica y fijación [76]. La precisión durante la intervención es crucial para obtener resultados adecuados. Nuevos enfoques sin abrir la fractura y la fijación mínimamente invasiva han mejorado considerablemente la recuperación de los pacientes [86, 87]. Sin embargo, actualmente es complicado conseguir una reducción precisa, ya que normalmente, sólo se suele tener acceso a dos radiografías periódicas durante la operación usando este enfoque. Esto provoca que no se haya resuelto todavía la malrotación de los fragmentos [88]. El análisis continuo de los elementos internos presentes permite comprender el estado interno de la fractura en todo momento, lo que permite desarrollar herramientas que permitan evitar este tipo de errores.

La identificación de patologías, la planificación de intervenciones e incluso, la asistencia en la toma de decisiones requiere del conocimiento de elementos anatómicos específicos. Además, es frecuente encontrar en las herramientas de asistencia por ordenador algoritmos que requieran como parámetro de entrada un tejido u órgano etiquetado. En la actualidad, y pese al gran número de avances relativos a la detección de puntos anatómicos [89], la mayoría de herramientas siguen siendo semiautomáticas, requiriendo una supervisión activa. Esto provoca que el proceso sea tedioso e impreciso, tal como Brownhill et al. [90] demostraron en el caso del codo.

Los trabajos de investigación correspondientes a esta parte son los siguientes:

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Hermenegildo Cañada-Oya, Francisco R. Feito, and Alberto D. Delgado-Martínez, "Automatic detection of landmarks for the analysis of a reduction of supracondylar fractures of the humerus," Med. Image Anal., vol. 64, p. 101729, 2020.

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Francisco R. Feito, and Joaquim Madeira, "A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-

specific supracondylar humerus fractures: a preclinical study,” J. Med. Syst, Under review.

5. Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación

A lo largo de este capítulo se han visto múltiples aplicaciones de la realidad virtual y aumentada en diferentes ámbitos de la medicina, principalmente centradas en la asistencia, ya sea antes, durante o después de la cirugía. Sin embargo, desde el punto de vista del paciente, también es posible el uso de este tipo de tecnologías. Principalmente estas aplicaciones están basadas en dispositivos móviles, que son los encargados de recrear la realidad virtual y aumentada.

Ramírez et al. [91] estudiaron el uso de estos dispositivos en pacientes y concluyeron que el 86% de los mismos presentaban un alto interés en aplicaciones que mejoren su salud. De especial interés son las relacionadas con el seguimiento del paciente, que ayudan en la recuperación y tratamiento de enfermedades crónicas [92–94].

En este apartado se analizarán una serie de pruebas médicas y tratamientos, principalmente relacionadas con el equilibrio, que pueden beneficiarse de la tecnología de realidad virtual.

5.1. Trastornos relacionados con el equilibrio

En algunas enfermedades como el Parkinson, es frecuente encontrar pacientes con una inusual dependencia de la estimulación visual para realizar tareas simples como andar, mover las extremidades, recoger objetos, seguimiento con la mirada, etc. Bronstein et al. [95] detectaron mejoras en las reacciones de estos pacientes cuando se utilizaba una estimulación visual basada en inmersión total. Como consecuencia, es fácil intuir que el uso de herramientas inmersivas como la realidad virtual puede provocar beneficios en este tipo de pacientes.

Por otra parte, existen indicadores que permiten valorar la percepción de los pacientes. La medida Visual Vertical Subjetiva (SVV, Subjective Visual Vertical) es una de las más utilizadas para valorar la percepción de la verticalidad en la práctica clínica. Proporciona información sobre la contribución vestibular en la cognición espacial. Este test consiste en ajustar una línea hacia la verticalidad. La orientación inicial se establece de forma aleatoria en un rango entre 30 y 60 grados con respecto de la vertical real, a izquierda o derecha. El paciente, sin tener ningún tipo de referencia del entorno, deberá alinearla a la posición más vertical

que considere. La desviación en personas sanas se suele mantener por debajo de 2.5° a derecha o izquierda [96].

La prueba SVV puede variar dependiendo de las necesidades del especialista, pudiendo ser estática o dinámica. La prueba estática consiste en mostrar la línea sobre un fondo sólido y la dinámica presenta figuras móviles en el fondo a modo de distracción.

Existen multitud de aplicaciones de esta prueba. Por ejemplo, es común encontrar desviaciones de la SVV después de ictus [97], en pacientes con Parkinson [95], esclerosis múltiple [98, 99] e incluso en pacientes con episodios de vértigo visual [100–102]. Además, hay autores que recomiendan introducir la medida de la SVV como prueba adicional a la hora de diagnosticar trastornos como la enfermedad de Ménière [103, 104].

La visual vertical subjetiva sirve como métrica con la cual se puede diagnosticar y realizar un seguimiento del paciente. Sin embargo, se necesitan otro tipo de tratamientos para afrontar el problema que haya originado esa desviación. Por ejemplo, la estimulación optocinética consiste en la exposición del paciente a una sucesión de barras, círculos u otro tipo de objetos en movimiento durante determinados períodos de tiempo. Este tratamiento mejora en mareos, inestabilidad postural y palia los síntomas de vértigo visual [105].

Los tratamientos basados en optocinéticos reciben su nombre debido a que su principal objetivo es estimular el nistagmo optocinético del paciente. Se define como el movimiento lento del ojo en la dirección en la que se desplaza una escena, para estabilizar la imagen percibida en la retina, acompañado después, de uno rápido en dirección opuesta. Un ejemplo de este reflejo es el seguimiento del paisaje en un viaje en coche: los ojos siguen despacio a un objeto hasta que desaparece del campo visual, lo que provoca que se vuelvan a llevar a la posición inicial para seguir a uno nuevo [106].

5.2. Dispositivos tradicionales

Actualmente, existen multitud de herramientas utilizadas en medicina tanto para tratamiento como para rehabilitación. En el caso de la SVV existe una gran variedad de dispositivos, la mayoría de ellos de elaboración casera, debido a la falta de estandarización. Piscicelli y Pérennou [96] realizaron un análisis de estos métodos. Los principales dispositivos que se pueden encontrar se detallan a continuación.

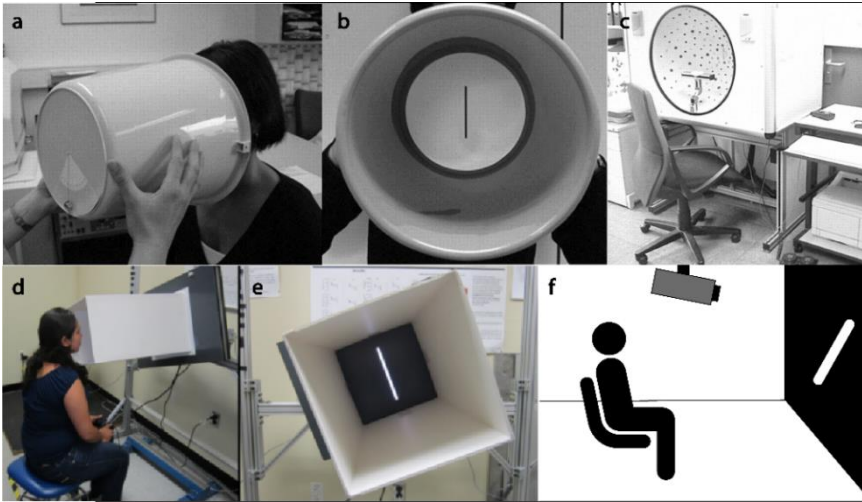


Figura 7. Enfoques clásicos para la medición de la visual vertical subjetiva

El método más común para la medición de la vertical visual subjetiva es la prueba de la cubeta [107]. Los pacientes estiman la orientación de la vertical intentando alinear una línea recta visible en el fondo de un cubo colocado en la cara del paciente (Figura 7.a,b). La línea se visualiza gracias a la luz que entra a través de una ranura practicada en el fondo del cubo. Inicialmente esta recta se rota aleatoriamente por el examinador.

Un método algo más elaborado consiste en una cúpula hemisférica con un patrón de círculos de colores, que abarca todo el campo visual del paciente, eliminando cualquier referencia de verticalidad (Figura 7.c). La línea se forma mediante un objeto alargado colocado en el extremo de un servomotor, que el paciente ajusta de forma mecánica. La diferencia entre la vertical real y la medida se calcula mediante un ordenador conectado al aparato. Algo parecido es el protocolo visuo-háptico [108–110], que consiste en orientar una barra metálica con luces rojas. Mediante un potenciómetro se registra la diferencia entre la vertical real y la percibida. Existen otros métodos, como el *rod and frame* [111], que consiste en orientar una línea luminosa usando un fondo distractor (Figura 7.d,e).

Por último, en ciertos estudios, ante la falta de estandarización, se proponen ciertos métodos caseros para la medición de la visual vertical subjetiva. La mayoría suelen estar basados en barras luminosas [112], en proyecciones en pared [113] o en pantallas de ordenador (Figura 7.f).

En el caso de la estimulación optocinética, el dispositivo más usado es un tambor con un patrón de rayas de diferentes tamaños que se gira manualmente delante del paciente (Figura 8). Existen sistemas más inmersivos en el que se introduce al sujeto en una cápsula, moviéndose las barras alrededor del mismo.

5.3. La realidad virtual como herramienta clínica

En base a los dispositivos descritos en el epígrafe anterior, se pueden establecer una serie de puntos en común a todos ellos: son muy aparatosos y la mayoría caseros. Para el caso de la medición de la visual vertical subjetiva, se puede añadir la necesidad del uso de habitaciones oscuras en la mayoría de los casos, para eliminar cualquier referencia de verticalidad. Por otra parte, para la estimulación optocinética, se puede intuir la dificultad en conseguir una velocidad de desplazamiento uniforme del tambor, ya que en la mayoría de los casos éste se realiza de forma manual.

La introducción de los dispositivos de realidad virtual permite solucionar la mayoría de los problemas. El aislamiento está garantizado por el propio visor. Los dispositivos médicos suelen ser específicos para una prueba, siendo necesarios multitud de ellos para cubrir diferentes pruebas y/o tratamientos. Además, es bien conocido el alto precio de los mismos, siendo el de los dispositivos RV irrisorio frente a ellos. Por último, la interacción manual por parte del especialista puede provocar o bien, errores de medición, o una mala ejecución del tratamiento (p. ej., es complicado realizar un movimiento de un tambor a una velocidad constante).

No obstante, es necesario realizarse una serie de preguntas antes de plantear soluciones a los problemas descritos: ¿Es posible introducir un dispositivo de bajo coste, como un móvil, en la práctica clínica? ¿Se obtiene precisión suficiente frente a uno tradicional?

Para contestar a las cuestiones y solucionar algunos de los problemas mencionados, varios autores desarrollaron sistemas basados en realidad virtual [46, 114]. Sin embargo, los detalles técnicos sobre la medición real de la SVV son muy escuetos. Las validaciones experimentales se realizaron con un número reducido de sujetos y no se tuvo en cuenta la influencia del hardware usado en la medida de la vertical subjetiva.

En el siguiente trabajo se presenta una descripción exhaustiva de cómo se realizan las pruebas, estudiando pormenorizadamente los aspectos de los dispositivos móviles que puedan influir en las distintas mediciones. Entre otros, se estudiarán tanto la precisión de los sensores de orientación móviles que puedan afectar a la validez del método, como la calidad de las pantallas digitales para el uso clínico.



Figura 8. Dispositivos clásicos para la estimulación optocinética

Asimismo, se presenta una experimentación detallada con el fin de validar clínicamente el sistema propuesto:

José Negrillo-Cárdenas, Antonio J. Rueda-Ruiz, Carlos J. Ogayar-Anguita, Rafael Lomas-Vega, and Rafael J. Segura-Sánchez, "A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device," J. Med. Syst., vol. 42, no. 7, p. 124, 2018.

Capítulo 3

Discusión de los resultados

En este capítulo se resumen los resultados de la investigación llevada a cabo a lo largo de la tesis doctoral, realizando una discusión de los mismos y extrayendo las conclusiones de cada uno de ellos. Los resultados giran en torno a una tarea principal:

- Estudio de la contribución de la realidad virtual y aumentada en medicina.

A raíz de la ella, surgen nuevos resultados, que pueden dividirse en dos partes:

- Cirugía mínimamente invasiva de reducción de fracturas (MIPO).
Detección de puntos anatómicos de interés.
- Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación de trastornos y patologías relacionadas con el equilibrio.

1. Contribución de la RV y RA en cirugía ortopédica y traumatología

En esta parte se detallan las tareas que conforman un proceso completo de tratamiento de cirugía ortopédica y traumatología, centrado principalmente en la reducción de fracturas quirúrgica. Además, se realiza un análisis de la contribución de la RV y RA en cada una de las tareas que se puedan realizar y perspectivas de futuro.

Principalmente, tal y como se ha mencionado anteriormente (capítulo 2, apartado 2.5), en una cirugía típica se pueden identificar tres grandes etapas: antes, durante y después de la operación.

A continuación, se hará una discusión de estos resultados específica para cada una de las etapas.

1.1. Antes de la operación

Actualmente todas las actividades implicadas en la fase previa a la cirugía se realizan asistidas por aplicaciones informáticas para identificar y planear la operación. La Figura 9 muestra la contribución de la realidad virtual y aumentada a cada fase de la planificación de la cirugía. Para cada tarea se indica su nivel de utilidad (U), si la potencia en la actualidad es suficiente (P), el grado de realismo de las sensaciones (S), la facilidad de la interacción (I) y el grado de implantación en la actualidad (GI). De acuerdo a las gráficas, se puede observar como la realidad virtual se postula como una gran ayuda en las artroscopias ya que, en la actualidad, sus resultados se muestran en una pantalla externa, siendo fácilmente portable a un sistema inmersivo. En cuanto a la realidad aumentada, se ha detectado que el diseño de fijación y prótesis se ve claramente beneficiado de estas tecnologías, sobre todo al combinarla con la impresión 3D. El especialista puede preparar los implantes usando copias del hueso impresas en 3D, añadiendo guía visual mediante RA. Por otra parte, consideramos que la identificación de fragmentos y la reducción virtual no están preparadas aún para implementar RV o RA. El principal motivo reside en que los mecanismos de interacción inmersivos existentes añaden más dificultades que beneficios con respecto al uso de dispositivos clásicos como teclado y ratón.

La realidad virtual y aumentada añaden un carácter inmersivo al diagnóstico y una forma alternativa a la visualización de la imagen médica [115, 116], permitiendo el acceso a partes ocultas de la anatomía. Estos sistemas permiten el diagnóstico colaborativo, pero pese a ser factibles en lo que a tecnología se refiere aún es un área inexplorada, especialmente en traumatología. Además, como ya se ha dicho, la interacción en RV/RA no cumple con las necesidades que requieren las tareas de planificación quirúrgica. Por ello, estos sistemas se limitan a visualizar modelos. Las NUI se presentan como una alternativa prometedora para resolver estos problemas.

El rendimiento es crítico en los sistemas inmersivos, más aún en entornos médicos, ya que se manejan representaciones muy detalladas de la anatomía. Por ejemplo, la representación de las piernas de *The Visible Human Project* [117] en su mayor detalle, ocupa 6.77 GB de memoria (9.96 MB por imagen, con 680 secciones). Es por ello, que hay que poner especial atención en técnicas de optimización. Sin embargo, consideramos que el rendimiento actual es suficiente, ya que normalmente las imágenes iniciales deben limpiarse y descartar información no relevante para resaltar las regiones de interés.

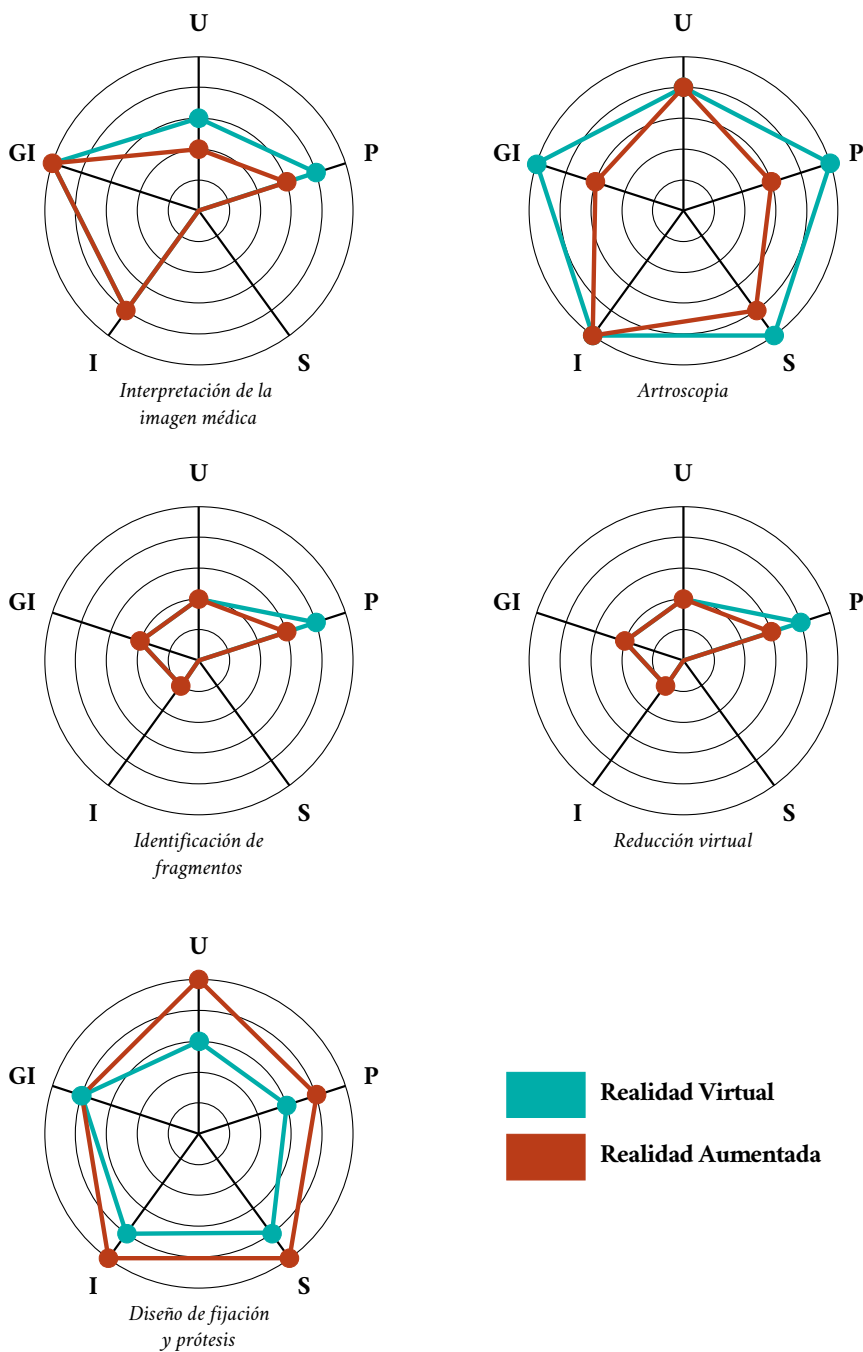


Figura 9. Gráficos de la situación de la RV y RA en tareas previas a la cirugía. U: Utilidad, P: Potencia, S: Sensaciones, I: Interacción, GI: Grado de implantación

Por último, el correcto diseño de prótesis es crucial para reducir el tiempo de operación. La comunidad científica propone dos vías para su diseño:

- Entornos puramente virtuales con dispositivos hápticos.
- Huesos impresos en 3D.

Si se toma la primera vertiente, las propiedades del hueso deben representarse con gran detalle, pudiendo traer problemas de rendimiento. Por ello, la calidad y variedad de las sensaciones es un reto presente para la realidad virtual. Como alternativa, consideramos que la impresión 3D sirve como solución a la complejidad de estas sensaciones, ya que se pueden representar modelos con la suficiente precisión, especialmente si se emplean materiales heterogéneos [118]. Combinada con RA, el cirujano puede recrear la situación con un realismo razonable.

1.2. Durante la operación

Actualmente, la realidad virtual se centra únicamente en sistemas de entrenamiento, no siendo posible su uso durante la operación, ya que no puede mostrar información en directo al cirujano. La Figura 10 muestra altos valores para la realidad aumentada y un bajo grado de implantación. Estos indican que la tecnología está preparada para implantar RA en el quirófano en la mayoría de las tareas, pero que no se ha hecho aún.

Cualquier tarea que pueda desarrollarse durante la operación es susceptible de ser entrenada, por ejemplo, disecciones, manipulación de fragmentos óseos, taladrado, etc. Los dispositivos hápticos juegan un papel muy importante ya que permiten representar los instrumentos involucrados en las mismas. Es por ello que las sensaciones son un aspecto crucial para desarrollar simuladores efectivos.

Además, la realidad virtual podría ser implantada indirectamente por robots en el futuro, realizando la reducción automática de fracturas. Aunque actualmente no es posible usar sistemas completamente autónomos para intervenciones complejas, ayudan a los cirujanos a realizar movimientos antinaturales [119, 120]. Los robots perciben los estímulos reales y los recrean como si de un mundo virtual se tratasen, dando respuesta al cirujano mediante hápticos.

Por otra parte, la realidad aumentada se centra en los asistentes quirúrgicos. En este contexto, el seguimiento en tiempo real del entorno y del cuerpo del paciente se convierte en el mayor de los requisitos. El registro en tiempo real de objetos deformables (como son los tejidos humanos) es un problema abierto en la actualidad y necesita muchas mejoras para poder implementarse en una cirugía

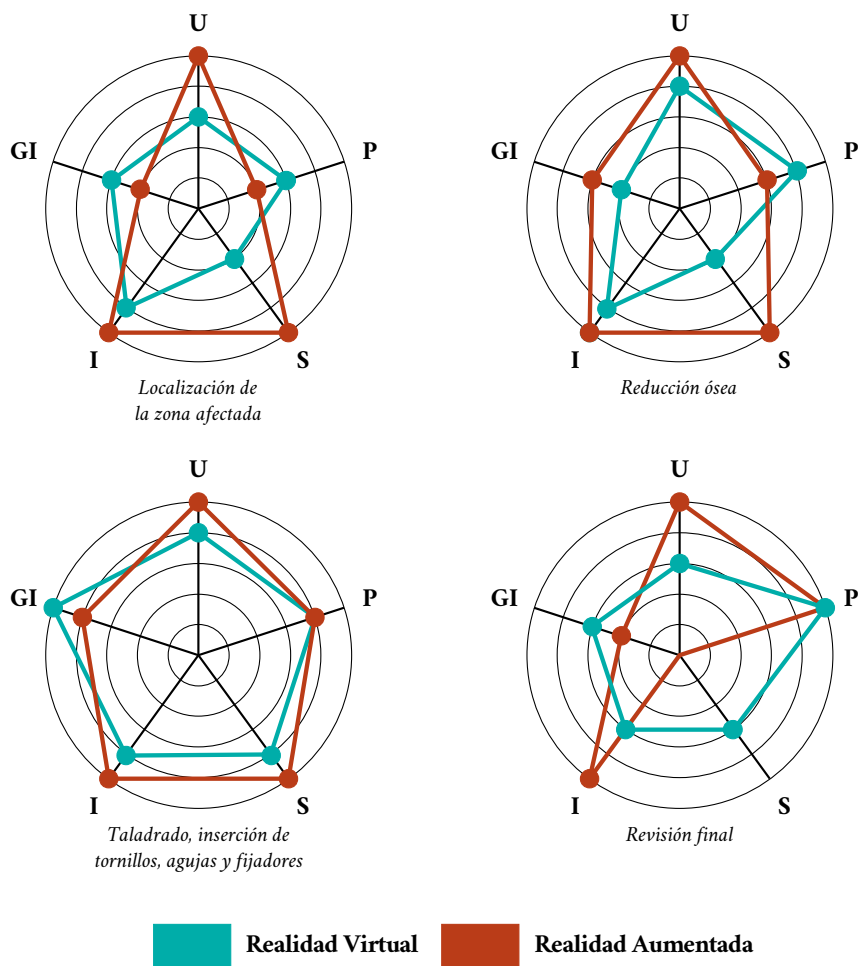


Figura 10. Gráficos de la situación de la RV y RA en tareas durante la cirugía.
 U: Utilidad. P: Potencia. S: Sensaciones. I: Interacción. GI: Grado de implantación

asistida por computador. Está relacionado inherentemente con la realidad aumentada sin marcadores, ya que necesita registrar directamente el cuerpo humano mediante el reconocimiento de estructuras anatómicas. Este enfoque es una tendencia en la actualidad, ya que reduce la intrusión y no hace falta insertar marcadores/posicionadores [121, 122]. Sin embargo, las imágenes médicas iniciales necesitan actualizarse continuamente para alimentar adecuadamente al sistema de realidad aumentada y actualmente la única forma de hacerlo es mediante nuevos CT o MRI, siendo inviable debido a la exposición radiológica.

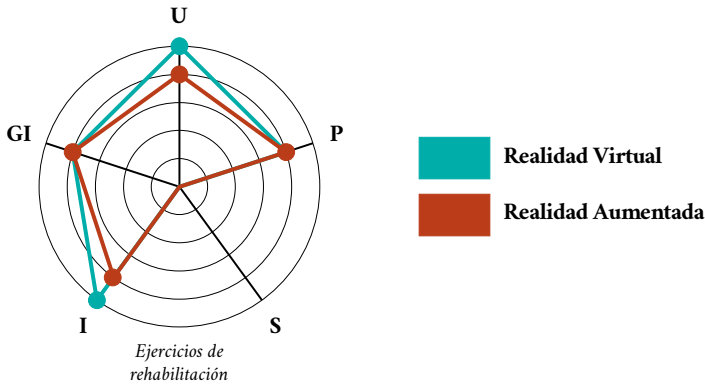


Figura 11. Gráficos de la situación de la RV y RA en tareas después de la cirugía.
 U: Utilidad. P: Potencia. S: Sensaciones. I: Interacción. GI: Grado de implantación

La realidad aumentada se usa, además, como alternativa en algunas ocasiones a los sistemas de entrenamiento basados en realidad virtual. Combinada con la impresión 3D se pueden replicar los órganos, permitiendo que el cirujano aprenda mediante su manipulación. Un conjunto de sensores captura el instrumental en tiempo real y se añade guía visual a la escena, como se haría en un sistema preparado para el quirófano.

1.3. Después de la operación

Pese al gran número de estudios relacionados con la realidad virtual en rehabilitación en otras disciplinas [22], se ha detectado una escasez de trabajos en ortopedia y traumatología. Este tipo de ejercicios requieren monitorización, ya que los especialistas necesitan comprender el estado del paciente y su progreso. La respuesta obtenida garantiza una monitorización diaria si fuera necesaria. El uso de dispositivos de realidad virtual o aumentada reduce el tiempo de recuperación y el coste, consiguiendo una rehabilitación más efectiva [123]. El auge de los serious games ha permitido que la RV/RA esté más presente en este tipo de tratamientos [124].

La telerehabilitación se postula como un interesante campo en el que aplicar tanto la realidad virtual como la aumentada, ya que se permite que los pacientes puedan realizar los ejercicios en casa, asistidos por un especialista si fuera necesario. Consideramos que la rehabilitación motora usando realidad virtual es un campo a explorar, importando técnicas de otras disciplinas.

Los principales retos de estos sistemas son la potencia, el realismo de las sensaciones y la fluidez de la interacción, además de la precisión y validez del registro de los movimientos (Figura 11). Estos problemas se irán solucionando progresivamente conforme vaya avanzando la tecnología: mayor potencia en los dispositivos, mejor conexión de red, etc.

En el futuro, se podrían implantar sensores en los propios huesos de los pacientes para monitorizar fuerzas y tensiones, previniendo comportamientos anormales del equilibrio biomecánico.

2. Cirugía mínimamente invasiva de reducción de fracturas (MIPO)

Como se ha mencionado anteriormente, para el estudio de la reducción de fracturas mínimamente invasiva se ha realizado un estudio de las marcas anatómicas del hueso en cuestión, haciendo una comparación con el contralateral. Además, se ha puesto a prueba mediante el desarrollo de un simulador para entrenar este tipo de procedimientos.

El estudio de la posición de puntos anatómicos, regiones y propiedades geométricas del húmero ha permitido que se pueda clasificar correctamente una reducción ósea como *válida* o *pobre* utilizando su correspondiente contralateral como plantilla.

Muchos de los elementos detectados dan pistas importantes sobre la posición de los fragmentos de la fractura. Por otra parte, otras no aportan suficiente información, como pueden ser el ángulo entre los ejes diafisarios y los radios de las cabezas del húmero. Cada métrica individualmente puede dar información sobre la causa de la fractura. Por ejemplo, si nos encontramos un caso en los que el epicóndilo y la epitroclea estén inversamente desplazados, podríamos suponer que se trata de una fractura en la que el fragmento inferior se encuentra rotado, y por ello, se puede estudiar el procedimiento a seguir para fijarla. La combinación de métricas permite además obtener resultados más fiables y robustos, contribuyendo a la decisión final de la calidad de la reducción.

El algoritmo presentado es sensible a las marcas que no pueden ser etiquetadas como tipos básicos (distancias, ángulos, áreas o volúmenes). El caso del surco bicipital es el más notable, ya que se clasifica como un punto cuando realmente es una ranura, dando por ello resultados más dispersos (2.4 mm con $p < 0.01$). Sin embargo, esta precisión es aceptable, ya que, como se ya se ha dicho, la cirugía MIPO presenta altos niveles de malrotación [88]. En cualquier caso, una buena

resolución y una segmentación adecuada de la imagen de entrada es necesaria para garantizar resultados fiables.

Relativo al simulador, se ha observado una alta tasa de aprendizaje ya que, a medida que los usuarios repetían la simulación, el resultado, sobre todo en tiempo y seguridad del paciente, tendía a mejorar. Especialmente se ha observado que los usuarios han empleado mucho menos tiempo en resolver los casos en una segunda vuelta. Además, los resultados de las encuestas de usabilidad han arrojado unos resultados prometedores, tanto en comodidad, utilidad y rendimiento.

3. Diagnóstico, tratamiento y rehabilitación de trastornos del equilibrio

En esta parte se ha presentado un sistema de realidad virtual de bajo coste para el tratamiento y rehabilitación de patologías relacionadas con el equilibrio. El sistema descrito es simple, flexible y de coste reducido, que permite el desarrollo de múltiples pruebas visuales.

Los resultados obtenidos revelan que el dispositivo es válido para un uso clínico preliminar, tal y como se ha realizado en los trabajos [125, 126]. La principal ventaja es su versatilidad, ya que permite implementar nuevas pruebas de forma sencilla. El uso de dispositivos móviles permite, además, distribuir cascos basados en Google Cardboard y sus respectivas aplicaciones en los móviles de los pacientes, permitiendo su uso desde casa, en lo que a ejercicios de rehabilitación se refiere. El especialista puede, a su vez, consultar los datos de los pacientes (resultados, ejecuciones, etc.) mediante una aplicación web de forma sencilla e intuitiva.

De igual modo, esta arquitectura puede ser extendida mediante dispositivos wearables, que permitan monitorizar ciertas constantes e indicadores del paciente a la hora de realizar ejercicios. Gracias a ellos, se puede realizar un seguimiento de los ejercicios de rehabilitación, por ejemplo, para la recuperación de la movilidad después de una cirugía.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

Por último, en este capítulo se analizan conjuntamente las principales propuestas y resultados realizados a lo largo de esta tesis y se proponen líneas de investigación futuras. Así mismo, se detallan publicaciones adicionales derivadas de este trabajo.

A lo largo de esta investigación se ha formalizado la aportación tanto de la realidad virtual, como de la realidad aumentada en diversas áreas de la medicina, haciendo especial hincapié en la cirugía ortopédica y traumatología. Uno de los objetivos de esta tarea es acercar al lector al uso actual y perspectivas de futuro de estos dispositivos para el diagnóstico, tratamiento y rehabilitación. Se proporcionan una serie de puntos de partida para que nuevos investigadores puedan introducirse en este campo, aún bastante inexplorado. Así mismo, se describen una serie de técnicas presentes en otras disciplinas que pueden ser adaptadas y usadas en cirugía ortopédica y traumatología.

En general, se puede apreciar que la realidad virtual es una tecnología preparada para asistir en tareas fuera del quirófano, ya sea antes o después de la cirugía. La realidad aumentada, por el contrario, tiene una mayor proyección durante la operación, en términos de asistencia a los especialistas. Tanto la RV como la RA son prometedoras en este campo, pero no están lo suficientemente exploradas aún como para reemplazar a los procedimientos médicos habituales.

En base a las lagunas encontradas en la literatura, se ha considerado la exploración de nuevos enfoques quirúrgicos mínimamente invasivos para la reducción de fracturas, como puede ser MIPO. En estos casos, es crucial definir una representación digital del cuerpo humano que pueda ser interpretada correctamente por aplicaciones informáticas. Gracias al cálculo de puntos de interés y regiones anatómicas se consigue una representación compacta, eficiente y eficaz para el estudio del progreso o evaluación en tiempo real de una intervención quirúrgica.

Estos nuevos enfoques mínimamente invasivos necesitan, por su novedad, cierto entrenamiento. El desarrollo de simuladores con este fin representa un ahorro, tanto en tiempo, como en esfuerzo (se necesitan menos cadáveres o maniqués específicos para aprender un procedimiento específico). Sin embargo, tal y como se ha discutido anteriormente, la interacción en realidad virtual todavía no satisface por completo los requisitos de las aplicaciones en medicina. Es por ello, por lo que en este trabajo se ha propuesto un simulador con un paradigma de interacción novedoso, que permite la recolocación de fragmentos óseos de forma realista.

Cabe destacar que, en esta tesis, se ha centrado la investigación en el estudio de las marcas del húmero en fracturas supracondíleas, aunque el enfoque descrito se puede extender a cualquier hueso largo.

Por otra parte, se ha detectado también que en ciertos ámbitos existe una falta de estandarización para el diagnóstico. La realidad virtual permite recopilar múltiples pruebas que tengan un carácter puramente visual en un único dispositivo, que puede ser, incluso, de mucho menor coste que el conjunto de maquinaria a la que sustituye. Además, el uso de estos dispositivos puede integrarse fácilmente en el llamado *Internet de las cosas*, produciendo, finalmente, sistemas ubicuos, en los que el paciente pueda recibir un seguimiento personalizado por parte de un especialista en un entorno seguro y cómodo, como puede ser, en su propio domicilio.

1. Trabajo futuro

De forma sintetizada, a raíz de este trabajo de investigación se dejan las siguientes líneas de investigación abiertas:

- Importación de técnicas procedentes de cirugía mínimamente invasiva general a su homóloga en cirugía ortopédica y traumatológica.
- Extensión de la detección geométrica de puntos de interés en húmeros a cualquier tipo de hueso largo sano o fracturado.
- Estudio de fracturas de diferentes tipos, más allá de las supracondíleas de húmero.
- Simulación quirúrgica de otros tipos de fracturas que pudieran ser tratadas usando un enfoque MIPO.
- Implantación de nuevas pruebas diagnósticas, tratamiento y rehabilitación de forma descentralizada relacionadas con trastornos del equilibrio.

2. Publicaciones adicionales

- José Negrillo, Rafael J. Segura, Antonio J. Rueda, and Carlos J. Ogayar, “Sistema inmersivo para la medición de la Vertical Visual Subjetiva,” in III Jornadas Andaluzas de Informática (JAI2017), 2017, pp. 10–13.
- José Negrillo, Juan R. Jiménez, and Francisco R. Feito, “A Usability Study for a Novel Approach to Virtual Reality Interaction,” in Spanish Computer Graphics Conference (CEIG), 2018.
- José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito, “Automatic Detection of Distal Humerus Features: First Steps,” in Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, 2019, pp. 354–359.
- José Negrillo-Cárdenas, “Estudio geométrico sobre modelos óseos humanos” in Jornadas de Innovación en Docencia e Investigación en Informática Gráfica y Realidad Virtual, 2019.
- Registro de propiedad intelectual: “Sistema de realidad virtual para detección y tratamiento de las patologías posturales y del equilibrio” © Rafael Lomas Vega, Rafael Jesús Segura Sánchez, Francisco Javier Molina Ortega, Carlos Javier Ogáyar Anguita, Antonio Jesús Rueda Ruiz, José Negrillo Cárdenas, Daniel Rodríguez Almagro, Safe Creative. Número de solicitud: 1901249725473, 24 enero 2019.

Capítulo 5

Publicaciones asociadas

En virtud con lo establecido en el artículo 25.2 de la normativa vigente para los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén del programa establecido en el RD.99/2011, en este capítulo se presentan los artículos que forman parte del núcleo central de la tesis doctoral, publicados durante la pertenencia del doctorando en el programa de doctorado.

Para cada publicación se muestra su información básica, así como los índices de calidad de las revistas en los que se han publicado. Este capítulo consta de cuatro artículos:

- José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito, "The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 191, p. 105407, 2020.
- José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Hermenegildo Cañada-Oya, Francisco R. Feito, and Alberto D. Delgado-Martínez, "Automatic detection of landmarks for the analysis of a reduction of supracondylar fractures of the humerus," *Med. Image Anal.*, vol. 64, p. 101729, 2020.
- José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Francisco R. Feito, and Joaquim Madeira, "A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-specific supracondylar humerus fractures: a preclinical study," *J. Med. Syst.*, Under review.
- José Negrillo-Cárdenas, Antonio J. Rueda-Ruiz, Carlos J. Ogayar-Anguita, Rafael Lomas-Vega, and Rafael J. Segura-Sánchez, "A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device," *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 7, p. 124, 2018.

1. The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito, “The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 191, p. 105407, 2020.

- Estado: Publicado.
- Revista: *Computer Methods and Programs in Biomedicine*.
- ISSN: 0169-2607.
- DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105407.
- Factor de impacto (JCR 2019): 3.632.
- Cuartiles por área de conocimiento:
 - Computer Science, interdisciplinary applications: Q2, 30/109.
 - Computer Science, theory and methods: Q1, 15/105.
 - Engineering, biomedical: Q2, 22/87.
 - Medical informatics: Q1, 6/27.

Abstract

Virtual and augmented reality have been used to assist and improve human capabilities in many fields. Most recent advances allow the usage of these technologies for personal and professional purposes. In particular, they have been progressively introduced in many medical procedures since the last century. Thanks to immersive training systems and a better comprehension of the ongoing procedure, their main objectives are to increase patient safety and decrease recovery time. The current and future possibilities of virtual and augmented reality in the context of bone fracture reduction are the main focus of this review. This medical procedure requires meticulous planning and a complex intervention in many cases, hence becoming a promising candidate to be benefited from this kind of technology. In this paper, we exhaustively analyze the impact of virtual and augmented reality to bone fracture healing, detailing each task from diagnosis to rehabilitation. Our primary goal is to introduce novel researchers to current trends applied to orthopedic trauma surgery, proposing new lines of research. To that end, we propose and evaluate a set of qualitative metrics to highlight the most promising challenges of virtual and augmented reality technologies in this context.

2. Automatic detection of landmarks for the analysis of a reduction of supracondylar fractures of the humerus

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Hermenegildo Cañada-Oya, Francisco R. Feito, and Alberto D. Delgado-Martínez, “Automatic detection of landmarks for the analysis of a reduction of supracondylar fractures of the humerus,” *Med. Image Anal.*, vol. 64, p. 101729, 2020.

- Estado: Publicado.
- Revista: *Medical Image Analysis*.
- ISSN: 1361-8415.
- DOI: 10.1016/j.media.2020.101729.
- Factor de impacto (JCR 2019): 11.148.
- Cuartiles por área de conocimiento:
 - Computer Science, artificial intelligence: Q1, 4/136.
 - Computer Science, interdisciplinary applications: Q1, 2/109.
 - Engineering, biomedical: Q1, 3/87.
 - Radiology, nuclear medicine and medical imaging: Q1, 16/85.

Abstract

An accurate identification of bone features is required by modern orthopedics to improve patient recovery. The analysis of landmarks enables the planning of a fracture reduction surgery, designing prostheses or fixation devices, and showing deformities accurately. The recognition of these features was previously performed manually. However, this long and tedious process provided insufficient accuracy. In this paper, we propose a geometrically-based algorithm that automatically detects the most significant landmarks of a humerus. By employing contralateral images of the upper limb, a side-to-side study of the landmarks is also conducted to analyze the goodness of supracondylar fracture reductions. We conclude that a reduction can be classified by only considering the detected landmarks. In addition, our technique does not require a prior training, thus becoming a reliable alternative to treat this kind of fractures.

3. A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-specific supracondylar humerus fractures: a preclinical study

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Francisco R. Feito, and Joaquim Madeira, “A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-specific supracondylar humerus fractures: a preclinical study,” *J. Med. Syst*, Under review.

- Estado: En revisión.
- Revista: *Journal of Medical Systems*.
- ISSN: 0168-5598.
- Factor de impacto (JCR 2019): 3.058.
- Cuartiles por área de conocimiento:
 - Health care sciences and services: Q1, 23/102.
 - Medical informatics: Q2, 10/27.

Abstract

Virtual reality has been used as a training platform in many fields, including medicine. Its usage allows to repeat a situation/scenario as many times as needed and make it patient-specific prior an operation. Of special interest for training is the minimally invasive surgery (MIS), since there are hidden organs and tissues to the surgeon. More concretely, minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) represents a novel technique in the context of orthopedic trauma surgery, but requires intensive training to acquire the required skills. In this paper we propose an immersive virtual reality platform for training the surgical reduction of supracondylar fractures of the humerus using a MIPO approach. The system presents a detailed surgical theater where the surgeon has to place the bone fragments properly. In addition, an experimental session has been carried out to validate its usefulness. The simulator presents promising results, with excellent accuracy in the reduction and a high learning rate.

4. A system for the measurement of the subjective visual vertical using a virtual reality device

José Negrillo-Cárdenas, Antonio J. Rueda-Ruiz, Carlos J. Ogayar-Anguita, Rafael Lomas-Vega, and Rafael J. Segura-Sánchez, "A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device," *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 7, p. 124, 2018.

- Estado: Publicado.
- Revista: *Journal of Medical Systems*.
- ISSN: 0168-5598.
- DOI: 10.1007/s10916-018-0981-y.
- Factor de impacto (JCR 2019): 3.058.
- Cuartiles por área de conocimiento:
 - Health care sciences and services: Q1, 23/102.
 - Medical informatics: Q2, 10/27.

Abstract

The Subjective Visual Vertical (SVV) is a common test for evaluating the perception of verticality. Altered verticality has been connected with disorders in the otolithic, visual or proprioceptive systems, caused by stroke, Parkinson's disease or multiple sclerosis, among others. Currently, this test is carried out using a variety of specific, mostly homemade apparatuses that include moving planes, buckets, hemispheric domes or a line projected in a screen. Our aim is to develop a flexible, inexpensive, user-friendly and easily extensible system based on virtual reality for the measurement of the SVV and several related visual diagnostic tests, and validate it through an experimental evaluation. Two different hardware configurations were tested with 50 healthy volunteers in a controlled environment; 28 of them were males and 22 females, with ages ranging from 18 to 49 years, being 23 the average age. The Intraclass Correlation Coefficient (ICC) was computed in each device. In addition, a usability survey was conducted. ICC = 0.85 in the first configuration (CI = 0.75-0.92), ICC = 0.76 in the second configuration (CI = 0.61-0.87), both with 95% of confidence, which means a substantial reliability. Moreover, 92.2% of subjects rated the usability of the system as "very good". Our evaluation showed that the proposed system is suitable for the measurement of SVV in healthy subjects. The next step is to perform a more elaborated experimentation on patients and compare the results with the measurements obtained from traditional methods.

Capítulo 6

English version

This chapter covers an English summary of the thesis entitled *Applications of virtual and augmented reality for assistance in medicine: planning, treatment and rehabilitation*, as partial fulfilment for obtaining the International PhD.

Firstly, an introduction to the research topic, the motivation, the proposed objectives and the structure of this thesis are outlined in section 1. Next, in section 2, a brief explanation of several concepts related to virtual and augmented reality and their applications in medicine is provided. Section 3 presents a discussion of the results obtained along this work. Finally, section 4 concludes the thesis and proposes future research lines.

1. Introduction

Medicine has always been a key research area in advanced societies. Computer graphics and medicine research areas have been strategically allied to overcome clinical challenges since the early 1970s. First applications dealt with 3D medical imaging systems, e.g., computerized tomography and magnetic resonances [1, 2]. This fruitful collaboration has many goals:

- Improvement of diagnosis.
- Treatment of increasingly complex injuries.
- Minimize recovery time after surgery, providing ways to carefully plan and study several processes involved [3].

Virtual reality (VR) and augmented reality (AR) encourage this relationship, allowing to perform quicker and safer tasks. Along the 20th century there were few VR/AR prototypes due to hardware limitations. Most recent advances in human-computer interaction, mobile devices, network connection, among others, have allowed VR and AR to be more present in our lives. Initially, these systems were focused on the improvement of our daily tasks and entertainment.

However, there is nowadays plenty of disciplines benefited from VR and AR: tourism, navigation, education, geometric modeling, industrial assistants, among others [4].

The motivation of this research is to study current trends related to virtual and augmented reality techniques which allow the development of new applications in medicine. Therefore, the following hypothesis is proposed:

“It is possible to develop new applications based on virtual and/or augmented reality to assist healthcare personnel before, during and after the surgery, which help to reduce both the time of the intervention and the risks associated to the patient, thus lowering recovery time.”

This hypothesis allows to establish a list of primary objectives:

1. Study the stages of a typical surgical intervention in the context of orthopedic trauma surgery and the contribution of virtual and augmented reality, concretely in bone fracture reduction.
2. Develop new representations and digital measures for human models and their visualization and interaction in VR/AR environments.
3. Develop applications to put into practice the generated models and assist in open tasks in the objective 1.

According to the article 25.2 of the current regulations for the PhD studies in the University of Jaén (RD.99/2011), this document is presented as a set of papers published by the PhD candidate. They are published in international journals indexed by *Web of Science* (WoS) and part of the annual *Journal Citation Reports* (JCR).

2. Background

This section describes theoretical concepts and previous works to contextualize the research. First, virtual and augmented reality concepts and their technical details are explained. Next, a brief analysis of their applications in medicine is carried out, with special interest to orthopedic trauma surgery, detailing their advantages, shortcomings and possible solutions. Finally, two specific applications are introduced, representing the core of this thesis.

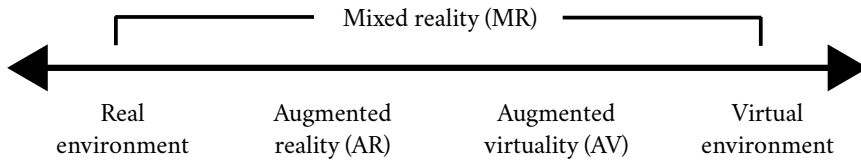


Figure 1. Simplified version of the reality-virtuality continuum.

2.1. Virtual and augmented reality

Virtual reality (VR) is the creation of a software environment presented as the real world. Its main goal is to convince the user that is in a real place by tricking the brain [5]. The immersion is mainly achieved by stimulating the user's sight and hearing. Head Mounted Displays (HMD), motion trackers, input devices and a computer running an application represent the elements that create this illusion. Traditionally, the virtual reality term has also been referred to non-immersive environments composed of a 3D world that can be explored interactively with a common desktop PC. But nowadays, this term mainly refers to immersive environments.

On the other side, augmented reality (AR) is a visualization of the real world enhanced with computer-generated information. AR simplifies the user experience by including synthetic elements and improving the perception and interaction. Then, while VR introduces the user in a fully synthetic world, AR superimposes information to the virtual objects in real-time. Both paradigms have multiple common aspects and, in most cases, are based on similar devices, having the same goal: provide the user with an improved or enriched experience.

According to Milgram et al. [6], there is a progression between real and virtual worlds, defined as the Reality-Virtuality Continuum (Figure 1). Mixed reality is defined as the space between VR and the real world, where both virtual and physical objects are presented simultaneously. However, in fields like medicine, any device that does not represent a pure virtual environment is known as augmented reality. This latter terminology will be used throughout this thesis.

The following subsections detail a list of general aspects related to VR and AR. First, interaction paradigms; next, visualization techniques; and finally, the most significant limitations with their possible solutions.



Figure 2. Examples of haptic devices

2.1.1. Interaction paradigms

Interaction represents the way users communicate with computers, i.e., to modify elements or receive feedback from the system. Depending on whether we use physical devices or not to manipulate the system, we can consider two paradigms: natural user interface or device-based interaction.

On one hand, Natural User Interface (NUI) is defined as the interface that allows to interact with a system without any external device or training [7]. Most of these interfaces are based on voice commands or gestures [8, 9].

In the case of 3D virtual environments, the most basic interactions are to select a given element and to place/orient it [10]. In a virtual environment, after a selection, the feedback is carried out by highlighting objects, playing sounds or generating some vibrations. In a NUI paradigm, the movement of a camera is linked to the device orientation, i.e., the head in HMD-based systems or the position/rotation in mobile AR. Besides the basic interactions, additional actions are usually required such as resizing or assigning a new color or material. By combining simple gestures with more sophisticated visual elements like radial hierarchical menus [11], the user experience is improved.

A proper implementation of NUI is critical in certain situations like during surgery to avoid the use of additional devices which could bother the correct flow of the procedure.

On the other hand, device-based interaction can be defined as the interfaces that require external devices to apply the user actions to the system. Formerly, the interaction with 3D virtual environments was carried out by using traditional 2D peripherals (keyboard and mouse). Modern interfaces with more Degrees of

Freedom (DoF) have emerged providing improved immersive environments, e.g., haptic devices (Figure 2). The purpose of haptics is to recreate the sense of touch in a computer by the application of forces, vibrations or movements. They can be classified as devices that provide either force or tactile feedback [12, 13].

Force feedback devices track one or multiple end effectors, replicating movements in a virtual world and instigating a force or torque response to the user [13]. The degrees of freedom represent the number of directions or rotations that a device is able to perform. Many commercial tools provide three DoF (movements along XYZ axes). This number of DoF can be increased to five or six by adding torque feedback.

In addition, tactile devices are based on mechanical cutaneous receptors including temperature, chemicals and several types of pain. The most common ones are grasping gloves. They yield a sensation of grabbing, pushing or moving objects in a virtual environment by applying forces and vibrations to the fingers [14–16]. Adding sensations require to attach physical properties to the virtual object like hardness, flexibility, resistance, temperature, etc. Volumetric representation, finite element analysis or tetrahedral meshes are frequently used to represent these features [17].

Finally, there are simpler devices designed to other purposes. For instance, mobile devices are an economical option for VR and AR. We refer the reader to the study presented by Telkenaroglu and Capin [18] to detail the challenges of the interaction with mobile devices. These devices can be employed in medicine, e.g., in orthopedic trauma surgery, as Jiménez-Pérez et al. [19] analyzed. Moreover, classical interaction devices like video game remotes can be used in specific cases, e.g., rehabilitation. For instance, McPhail et al. [20] proposed a system with a Nintendo Wii™ controller for lower limb rehabilitation exercises.

2.1.2. Visualization

The previous section detailed the input component of the interaction and its physical response. However, visual-based interaction is the most common way of showing information between users and computers. A visualization device is able to display data and present the current state of a system. Available screens range from simpler ones to more sophisticated such as HMD. Companies are aware of modern virtual and augmented reality requirements and continuously develop new improvements. Google Glass (Google, Mountain View, USA), Microsoft HoloLens (Microsoft, Redmond, USA), HTC Vive (HTC, Taoyuan, China) among many others, are examples of this kind of devices (Figure 3).



Figure 3. From left to right: HTC Vive ©, Microsoft HoloLens © and Google Glass ©

Virtual reality requires stereo vision and the differences between devices lie on the screen quality. In the case of augmented reality two alternative technological solutions are available: video see-through or optical see-through screens [4].

Video see-through devices capture images from a camera and display them in a screen, superimposing virtual information on the frames, e.g., mobile augmented reality. This approach eases the process of matching real world and computer-generated elements. Yet, they show some drawbacks:

- An absolute smoothness cannot be reached as users watch a screen instead of the real world.
- In case of a system failure, the user would *become blind* unless the device was removed. This is especially dangerous in critical situations, e.g., during surgery.

In contrast, optical see-through devices work with a set of mirrors and projections, adding synthetic information on the user's direct vision. It can be inferred that the user directly sees the real world without passing through a screen. Google Glass and Microsoft HoloLens employ this technology. They have two main advantages:

- The user directly perceives the real world, obtaining a natural fluidity of the images.
- The user vision is unobstructed in case of system failure.

However, the most important disadvantage is the complexity of exactly matching the virtual world with the optical stream, hence a preliminary calibration becomes necessary [21].

Alternatively, there are non-HMD based systems such as tablets, mobiles phones or other types of embedded screens at our disposal. For instance, a minimally invasive surgery (laparoscopies or arthroscopies) can be guided by image by using a screen to visualize the internal organs of a patient [22].

Previously mentioned devices are based on the visualization of the information in a screen or similar. Nevertheless, there are alternative paradigms to AR, such as projected augmented reality [23]. Occlusions are an important challenge in this kind of systems because the user is placed between the projector and the body. Hand-held projectors try to overcome these problems as they are placed in front of the surgeon [24].

2.1.3. Technological limitations and possible solutions

Virtual and augmented reality systems have certain limitations, especially regarding the quality of an immersive experience. Performance is a critical feature in these systems, especially to augmented reality devices as they also need processing the real-world image stream on the fly [25].

The delay that can appear in VR and AR at low frame rates causes a negative effect on the experience, as humans are very sensitive to lag. A delay from 100 to 300 milliseconds destroys the immersion and must be addressed to avoid the so-called motion sickness [26, 27].

It is well known that these technologies have similar hardware as mobile devices. In fact, the performance of VR/AR systems is approximately ten years behind the latest desktop computer [28]. Some approaches such as cloud-based visualization, levels of detail or data compression attempt to reduce this gap.

Interaction also presents several challenges. A very common concern, especially for low-quality AR systems, is inattention blindness, also known as perceptual blindness. It is defined as a psychological lack of attention not associated with any visual defect. In other words, the situation where a person fails to perceive a stimulus in their line of vision caused by the overstimulation of the sense of sight [29, 30]. Excessive details presented to the user in immersive systems result in perceptual blindness. The most effective way to improve the inattention blindness is to minimize and simplify the information presented, forcing the user to only focus on the relevant data.

2.2. Applications of VR and AR in medicine

Virtual and augmented reality systems are applied to multiple situations in medicine. They are a cheap and efficient alternative in most stages of patient treatment and to perform many procedures [22]. VR and AR have been gaining popularity in recent years, so there are many reviews of these platforms applied to medicine and surgery:

- Li et al. [22]. Applications in clinical medicine, focusing in virtual reality for treatment.
- Ruikar et al. [31] and Vaughan et al. [32]. Training simulators for orthopedic trauma surgery, discussing the role of medical education in surgical interventions.
- Escobar-Castillejos et al. [33]. Haptic technology to create realistic simulators.
- Vávra et al. [34]. Augmented reality for general surgery, focusing on surgical navigation.
- Bernhardt et al. [35]. Laparoscopic surgery.
- Meola et al. [36]. Augmented reality in neurosurgery.

This section presents the main applications of VR/AR grouped by the following categories: treatment and rehabilitation, medical training, assistance during surgery, collaborative environments and medicine. Finally, a special section is dedicated to orthopedic trauma surgery.

2.2.1. Treatment and rehabilitation

Virtual and augmented reality can be employed as a tool for performing several treatments based on visual stimulation and rehabilitation exercises.

The treatment of psychological diseases, e.g. phobias and emotional disorders, often requires to expose the patient to traumatic situations. These treatments are known as exposure therapies [37]. Virtual and augmented reality technologies allow to recreate scenarios such as social interactions, certain injuries and other phobic stimuli, in a secure and controlled environment. The representation of these situations in VR is a very effective solution, as specific environments can be created and adapted to the patient [38, 39].

Another application is for pain management, becoming often chronic. Pain management units are responsible for applying therapies to reduce hurt. A patient could require a specialist when their pain becomes out of control or chronic. Hoffman et al. [40, 41] developed the first virtual reality tool for pain modulation, which demonstrated its effectiveness in reducing suffering. Several studies confirmed that chronic pain patients had progressively reduced their symptoms when exposing them to VR distraction therapies [42–44].

Finally, virtual and augmented reality devices are also employed for several vestibular rehabilitation exercises that generally require absolute isolation from the environment [45–47]. They will be detailed in section 0 of this chapter.

2.2.2. Training

Historically, medical training has been performed by using cadavers or mannequins, where trainees learn under the supervision of an experienced specialist. It is reasonable to think that this approach is unsustainable in the academic environment, as certain procedures can only be performed once per specimen, requiring then, a high number of cadavers to train a classroom. Additionally, the continuous evolution of medicine motivates surgeons to study and train new safer surgical techniques.

The usage of virtual and augmented reality systems represents a step forward in medical training. This technology allows simulating multiple virtual scenarios adapted to the required conditions, even to those rare pathologies. In fact, simulator-trained apprentices perform surgical procedures faster and safer than classically trained surgeons [48, 49].

Modern haptic devices enhance virtual reality experiences by improving the sense of touch in simulators [32, 50]. Companies are aware of these requirements and have developed complete training simulators to teach several surgical procedures, e.g., VirtaMed® o Swemac®.

Finally, AR is becoming an alternative to VR for medical training. By combining mannequins, cadavers or 3D printed organs with synthetic data, the experience is enriched with extra information or instructions [51].

2.2.3. Assistance during surgery

During surgery it is reasonable to only focus on augmented reality technology, since specialists requires to interact with tangible entities instead of a completely synthetic world. It supports adding relevant data to surgeons during surgery in real time. Instructions, vitals or hidden anatomical structures represent significant information to expose to specialists [52].

Many surgical disciplines have been benefited from augmented reality. Of special interest are minimally invasive procedures as surgeons cannot see internal organs without specific instruments [35, 53, 54], orthopedic and trauma surgery [34], robot-assisted surgery [55], neurosurgery [36] or classical interventions [56], as Figure 4 depicts.

2.2.4. Collaborative environments and telemedicine

There are situations in which additional actors are required interacting with the same elements. Collaborative environments allow multiple users to interact with

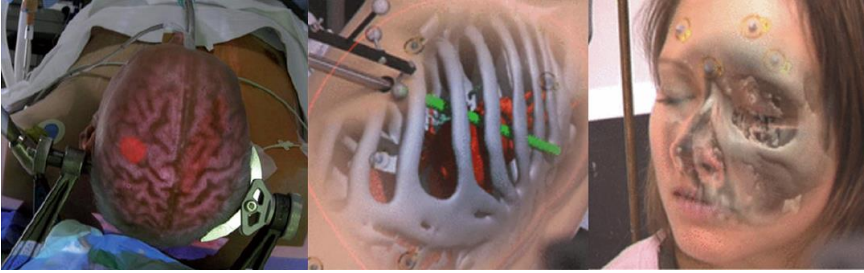


Figure 4. Superimposing virtual organs on the patient skin [53, 54]

a unique system simultaneously. Computer-supported cooperative work [57] can be integrated in medicine in some scenarios like training [58–62] or surgery [63].

Above-mentioned systems are commonly based on telepresence, which consists of the introduction of a remote observer in a scene [64]. Telemedicine is an application of this concept to provide remote medical assistance via telecommunications. This technology was initially as simple as a direct call to a doctor. A more comprehensive assistance is established through improvements in communications and display devices. Telemedicine can be employed to provide support to unequipped health centers that only have general medicine. In that case, a specialist in a hospital wearing an HMD can give instructions for stabilizing a patient with a specific emergency [65].

2.2.5. Orthopedic trauma surgery

Multiple computer-assisted tools were developed for orthopedics. Most of them are mainly focused on fracture reduction-related procedures [66–75]. However, we have realized that a gap is present with respect to the other surgical procedures previously mentioned in terms of virtual and augmented reality usage. Therefore, an analysis of the current state of VR and AR is presented in this section, analyzing the further improvements to adapt the referred tools to VR/AR requirements. The usefulness, weaknesses and our perspective are also discussed to make these technologies more feasible for this medical specialty in the future. Moreover, the integral process of a fracture reduction is specified, going from diagnosis to rehabilitation.

Before starting, it is necessary to ask yourself the following questions: What procedures are included in orthopedic and trauma surgery? What is a bone fracture? What does fracture reduction consist of and in what stages is it divided?

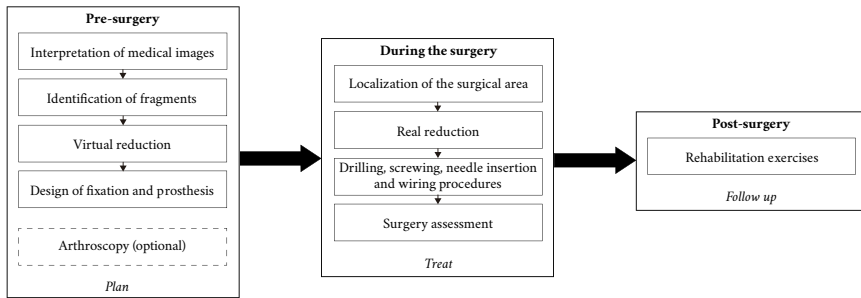


Figure 5. Flowchart of the tasks performed in bone fracture reduction surgery.

Orthopedic trauma surgery attempts to repair injuries in the musculoskeletal system, mainly caused by accidents, often requiring a rapid action. Although not every injury could be fatal, they significantly affect the patients' normal life. Apart from lesions, orthopedic trauma surgery deals with treatment of diseases related to the locomotor system.

Related to the second question, we found the term *bone fracture*. It consists of the interrupt of the osseous continuity caused by mechanical trauma [76]. In other words, it represents the break of a bone in two or more fragments, because of an abrupt impact. Sometimes, a fracture could appear after a disease, which causes an unusual fragility of the bony tissue.

The process to fix a broken bone is named *fracture reduction*. It consists of the alignment of the fragments to recover a proper anatomical position. They could require fixation with screws, plates or implants depending on the type and complexity [3]. Commonly, the treatment of fractures which require surgery can be divided in three stages: pre-surgery, during surgery and post-surgery (see Figure 5). In the first stage, the procedure is planned and carefully studied. Next, the intervention is performed and evaluated. Finally, after the surgery, the rehabilitation requirements are planned, executed and redefined, and the patient recovery is periodically assessed. The research work associated with this part is the following:

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito, "The role of virtual and augmented reality in orthopedic trauma surgery: From diagnosis to rehabilitation," Comput. Methods Programs Biomed., vol. 191, p. 105407, 2020.

2.3. Open problems of VR and AR in medicine

Along this section, trends of virtual and augmented reality in medicine have been explained. We especially focused on orthopedic trauma surgery, concretely, on bone fracture reduction. The following idea can be extracted from that: Augmented reality is a useful tool for tasks related to surgical assistance, especially to comprehend the internal state of tissues during the intervention. In addition, by combining AR with 3D printing, it can serve as an affordable alternative to virtual reality for training purposes.

Among others, one of the challenges is related to minimally invasive fracture reduction surgery. Due to its features, it requires the use of computer assisted tools to help to understand the internal state of the patient in real time. Therefore, a meticulous planning is required to perform the intervention and minimize patient risk.

On the other side, virtual reality is an effective technology for tasks outside the operating theater, e.g., to support the specialists (planning surgical procedures) or to assist the patients (rehabilitation exercises and diagnosis).

In this case, we noted that the upgrade and unification of the existing diagnostic tools used in pathologies related to body balance are a current concern. In some ways, these tests have not evolved as much as those related to surgery, since currently, they are performed using analogical devices. In section 2.5, the problems will be outlined and some solutions will be proposed both for diagnosis, data collection, analysis and monitoring.

2.4. Minimally invasive reduction of humerus fractures

So far, we have discussed multiple times about minimally invasive surgery and its advantages with respect to classical methodologies. This approach has been extended along time to other disciplines, e.g., orthopedic trauma surgery. Traditionally, a fracture was repaired by a firm union of fragments. Nevertheless, the scientific community has observed that by solely focusing on reducing the mobility and maintaining some clearance between the fragments, a stronger union is produced. Therefore, a rigid internal fixation is not necessary.

As a result, the surgical fracture reduction has evolved to more biological methods: minimally invasive osteosynthesis (MIO), or other derived approaches like less invasive stabilization systems (LISS). They consist of plates with grooves to ease and secure the insertion of screws. From this technique appeared the locking compression plate (LCP) which can be used as an internal fixation and a

standard compressor. This fact allowed LCP to be used for minimally invasive interventions, also avoiding the precise modelling of the plate to the bone. Minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) introduced novel types of LCP designed for specific parts such as tibia, femur and humerus. We refer the reader to [77] for more details regarding this technique.

2.4.1. Anatomy of the humerus

In this section, the anatomy of the humerus is detailed to contextualize its fractures and the available approaches to treat them (see Figure 6). The humerus is a bone placed in the arm that connects shoulder and elbow. It is considered a *long bone* of the human body, so consists of three parts:

- Proximal epiphysis. It is a spherical region belonging to the shoulder, part of the glenohumeral joint.
- Shaft. A long and cylindrical body, determining the arm direction.
- Distal epiphysis. It is part of the elbow, composed of the humerus articulating with both radius and ulna.

The head of a humerus is the most representative part of the proximal region. Apart from that, several zones allow tendons and ligaments to be inserted into the bone. For instance, both greater and lesser tubercles define the bicipital groove.

The most distal part consists of a particular contour to adapt the humerus to the ulna and radius, allowing the flexion/extension of the elbow joint. Mainly, it contains the coronoid and olecranon fossae, trochlea and capitulum. In addition, lateral and medial epicondyles define the width of this joint, also known as the epicondylar distance.

Apart from the referred features, additional geometric landmarks can be defined in order to improve diagnosis or to compare cases such as axes and regions. For example, Müller [78] defined a square for long bones to determine the nature of their fractures. It is determined by a quad whose sides are the same length as the widest part of the related epiphysis. Specifically, a humerus contains two Müller squares located in proximal and distal parts, respectively. In addition, the Humeral Shaft Axis (HSA) represents the line along the humerus, passing through distal and proximal endosteal canals [79]. The Epicondylar Axis (ECA) is also designated as the line that connects medial and lateral epicondyles. Finally, the Flexion-Extension Axis (FEA) is computed to represent the articulating axis of the elbow.

We refer the reader to [80–84] for further details regarding the anatomy of the humerus and its implications for shoulder and elbow joint groups.

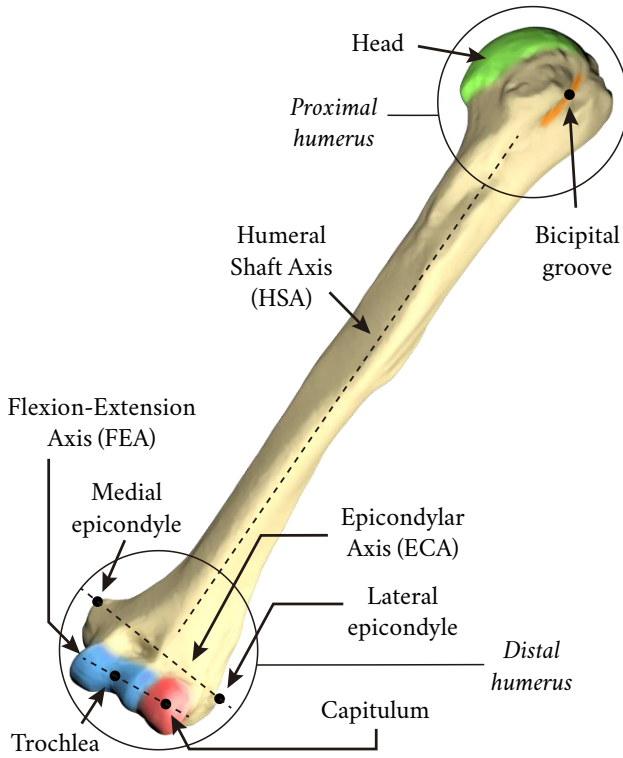


Figure 6. Anatomy of the humerus

2.4.2. Labeling and analysis of fracture reduction

A proper detection of anatomical features represents a fundamental part of computer assisted surgical applications since, they are frequently the input of certain tools. The identification of tissues in these images was performed manually, which proved to be an inaccurate and tedious process. For this reason, the automatic identification of tissues is a promising line of research of modern medicine. Recent advances allow us to develop sophisticated computer-assisted tools for diagnostic purposes, taking advantage of the detection of features, organs or landmarks [85].

Regarding orthopedics, an accurate identification of bone features enables a better comprehension of the musculoskeletal system, e.g., it is easier to study diseases or fractures and training interventions, to design prostheses, and to deploy computer-assisted orthopedic surgery (CAOS) tools. Patient-specific

solutions enable the planning of custom procedures to enhance designs, reduce surgical time, and in this way, to improve the recovery after treatment [3].

Most of these procedures begin with an identification of anatomical landmarks. In particular, joints require an accurate alignment of the articulating bones to enable an appropriate movement. To be specific, supracondylar humerus fractures have represented about the 2% of all fractures in the last decade. Most of them require surgical reduction and fixation [76]. The accuracy in the procedure is crucial to obtain proper results. New approaches involving the reduction without opening the fracture and the fixation with minimally invasive techniques have further improved the recovery in these patients [86, 87]. Unfortunately, an accurate reduction is now difficult to obtain, as only two periodical X-ray views are available in the operating room in many procedures and malrotation of the fragments has not yet been resolved [88]. Consequently, the assessment of the landmarks of the bones allows to comprehend the internal state of the fracture, enabling to develop new tools to avoid this kind of errors.

A proper detection of anatomical features is required for identifying pathologies, planning an intervention or making decisions. In addition, a labeled tissue is the input of many computer-assisted medical applications.

The identification of pathologies, surgical planning and even assistance in decision making requires knowledge of specific anatomical elements. In addition, most computer assisted tools require as input a labeled tissue or organ. Nowadays, there are important advances regarding landmark detection [89]. Nonetheless, in spite of the number of semiautomatic computer-assisted tools, an active supervision is still required. This supervision makes the detection tedious and inaccurate, as Brownhill et al. [90] demonstrated in the elbow.

The works related to this part are listed below:

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Hermenegildo Cañada-Oya, Francisco R. Feito, and Alberto D. Delgado-Martínez, "Automatic detection of landmarks for the analysis of a reduction of supracondylar fractures of the humerus," Med. Image Anal., vol. 64, p. 101729, 2020.

José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, Francisco R. Feito, and Joaquim Madeira, "A virtual reality simulator for training the surgical reduction of patient-specific supracondylar humerus fractures: a preclinical study," J. Med. Syst, Under review.

2.5. Diagnosis, treatment and rehabilitation

Along this chapter, multiple applications of virtual and augmented reality have studied in diverse medical disciplines, mainly focused on assist specialists before, during or after surgery. However, we can analyze them from the point of view of a patient. Commonly, mentioned applications are based on mobile devices, being responsible for *building* the virtual and augmented reality.

Ramirez et al. [91] studied the usage of mobile devices and concluded that 86% of users were interested in using smartphone apps to improve their health. Of special interest are applications related to patient follow-up, as they help in their recovery or the treatment of chronic diseases [92–94].

This section analyzes a set of medical tests and treatments that could take advantage of virtual reality, mainly related to body balance.

2.5.1. Pathologies related to body balance

In some diseases like Parkinson's, an unusual dependency of visual stimuli to perform simple tasks such as walking, moving arms or picking up objects, among others, is very frequent. Bronstein et al. [95] detected improvements in these reactions when employing an immersive visual stimulation. Therefore, we can consider the virtual reality as a useful tool to treat this kind of pathologies.

Several metrics allow to evaluate the visual perception of patients. The measurement of Subjective Visual Vertical (SVV) is one of the most common tests for the evaluation of the perception of verticality in clinical practice. It provides information regarding the vestibular contribution in spatial cognition. The SVV test consists of adjusting a random-oriented line to the vertical position. The initial orientation is usually between 30 and 60 degrees right or left. A patient, seated and in a comfortable position, has to align it to the vertical position without any external visual reference. This posture allows the specialist to help in case the patient cannot maintain the correct position by himself. The consensual values, considered as normal for SVV, are between -2.5° and 2.5° with respect to the actual vertical [96].

This test can be static or dynamic. When the line is shown in front of a plain background, the SVV is named static. On the other hand, if the background shows moving circles or other shapes, the test is called dynamic.

There are many applications of this test. For instance, biases in this perception are frequent after stroke [97], in patients with Parkinson's disease [95], or multiple sclerosis [98, 99]. Abnormal values of the SVV have been correlated with several

peripheral vestibular disorders as the benign paroxysmal vertigo [100–102]. Additionally, several authors suggest to introduce a SVV analysis to the set of tests in order to detect pathologies such as Ménière's disease [103, 104].

The subjective visual vertical is useful as a metric for diagnosis and to follow up a patient recovery. Nonetheless, other treatments could be required to face the disorder. For instance, optokinetic stimulation consists of exposing the patient to a set of periodical moving shapes (bars, lines, circles, etc.) during a predefined time. This treatment improves dizziness, postural instability and symptoms of visual vertigo [105].

Treatments based on optokinetics are intended to stimulate the optokinetic nystagmus. It consists of the slow movement of the eye following the direction of a moving scene. Next, a rapid movement in the opposite direction appears to restore the initial position. An example of this reaction is where traveling by car: eyes slowly follow a tree until going outside the visual field, causing a reaction to shift them to the initial position and focus on another one [106].

2.5.2. Traditional instruments

Currently, there are many tools used in medicine both for training and rehabilitation. In the special case of SVV, there are plenty of them, being primarily, custom built by hand, because of a lack of standardization. Piscicelli and Pérennou [96] made a survey about these methods, being detailed as follows.

The most common approach is the bucket test, proposed by Zwergal et al. [107]. In this method, patients estimate the vertical orientation by attempting to properly align a straight line visible on the bottom of a bucket that is rotated randomly by the examiner (Figure 7.a,b). The line is formed by the light which enters through a groove made in its bottom.

A slightly more elaborated method uses a hemispheric dome with a surface of 60 cm in diameter that extends over the entire visual field with a random pattern of colored dots, providing no cues to gravitational orientation (Figure 7.c). A linear target is fixed on the shaft of a servomotor, and a computer is used to record the difference between the line and the true vertical. The visuo-haptic vertical protocol consists of manually orienting a metal rod with red diodes. A potentiometer displays the angle between the true and the perceived vertical [108–110]. Other methods, such as the rod and frame test [111], require the orientation of a luminous line on a distracting background (Figure 7.d,e).

Finally, in certain studies and caused by the lack of standardization, a few more protocols are used to measure the SVV. Most of them are based on a mechanical

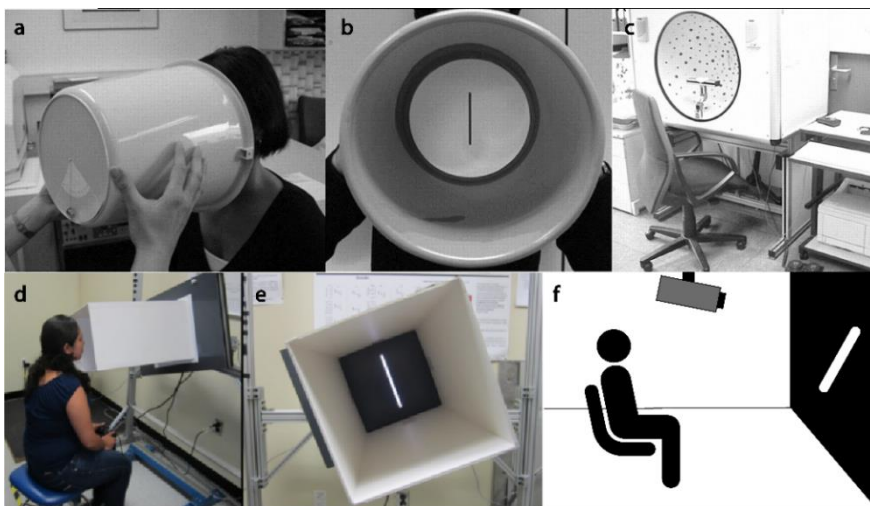


Figure 7. Classical paradigms to measure the subjective visual vertical

luminescent rod [112], luminous lines projected on a wall [113] or displayed on a computer screen (Figure 7.f).

Regarding optokinetic visual stimulation, the most common tool is a cylinder with a line pattern rotated uniformly in front of the patient (Figure 8). There are other more immersive systems in which the subject is introduced in a capsule, having the bars moving around them.

2.5.3. Virtual reality as a clinical tool

Based on the devices described above, several common aspects can be established: in general, they are cumbersome and most of them home-made. In the special case of SVV, an additional item is required: a dark room to isolate the patient, removing clues of verticality. On the other side, optokinetic drums require a constant rotation, being difficult in some cases since the movement is performed manually by a specialist.

The rise of virtual reality devices allows to solve most of the problems addressed. The isolation is guaranteed by the headset. Moreover, medical devices are often specific per test, requiring much equipment to cover multiple treatments and analysis. In addition, their cost is extremely higher compared to virtual reality systems. Finally, the manual interaction of the specialist can introduce observation errors or a bad execution of the treatment.



Figure 8. Classical paradigms for optokinetic stimulation

Nevertheless, it is necessary to ask yourself a set of questions before proposing solutions to the problems related: Is it possible to introduce a low-cost device (a smartphone) into clinical practice? Is the accuracy enough compared to a classical one?

In order to answer these questions and overcome the related problems, several authors proposed virtual reality-based systems [46, 114]. Unfortunately, they provide few details about how static and dynamic SVVs are effectively measured. The experimental validation of the method has also been done with a modest number of subjects (15) and they have not considered the influence of using different hardware in the SVV measurement.

The following research presents an exhaustive description regarding technical details of the tests, by carefully assessing the elements of mobile devices which could affect the measurement. The precision of the orientation sensors and the screen quality are studied in deep. Finally, a detailed experimentation is presented to validate the proposed system:

José Negrillo-Cárdenas, Antonio J. Rueda-Ruiz, Carlos J. Ogayar-Anguita, Rafael Lomas-Vega, and Rafael J. Segura-Sánchez, "A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device," J. Med. Syst., vol. 42, no. 7, p. 124, 2018.

3. Discussion of results

In this section, a summary of the results produced by the conducted research is exposed, discussing them and extracting conclusions. Results are related to a main task:

- Study of the contribution of virtual and augmented reality in medicine.

As a consequence, new results emerge and are divided in two parts:

- Minimally invasive fracture reduction surgery (MIPO). Landmark detection.
- Diagnosis, treatment and rehabilitation of disorders and pathologies related to body balance.

3.1. Contribution of VR and AR to O&T surgery

This part discusses the contribution of virtual and augmented reality to the tasks involved in a surgical fracture reduction. Mainly, as mentioned before (section 2.2.5), a typical surgery can be divided in three steps: before, during and after the intervention. The following subsections discuss the results per stage.

3.1.1. Pre-surgery

Currently, all activities involved in the pre-surgery stage are carried out with computers to identify and plan the intervention. Figure 9 shows the contribution of virtual and augmented reality technologies to the pre-surgery stage. For each task, the following aspects are analyzed: utility (U); whether the current available power is enough or not (P); the realism of the sensations (S); the simplicity of the interaction (I); and the current technological fulfillment (TF). According to its highest values, virtual reality is an adequate solution for arthroscopy as external screens are necessary to observe internal parts of a joint. The design of fixation devices represents the best scenario to employ augmented reality combined with 3D printing, as the surgeon is allowed to adapt flexible plates to a realistic copy of a bone. On the contrary, we consider the identification of fragments and virtual reduction planning to be the less prepared tasks for the use of VR or AR, since the interaction employing these devices is more complex than using a classical keyboard and mouse.

Virtual and augmented reality add an immersive component to diagnosis and an alternative method to visualize medical images [115, 116], allowing the access to several hidden parts of human anatomy. These systems support collaborative diagnosis but, in spite of being technology-feasible, it is an almost unexplored field, especially in orthopedics. Furthermore, current VR/AR interaction mechanisms do not fit in most requirements of planning tasks. In this context, virtual and augmented reality limit their use to visualize the models. Natural user interfaces are trying to solve out the mentioned problems by including easier interaction scenarios and reducing learning time.

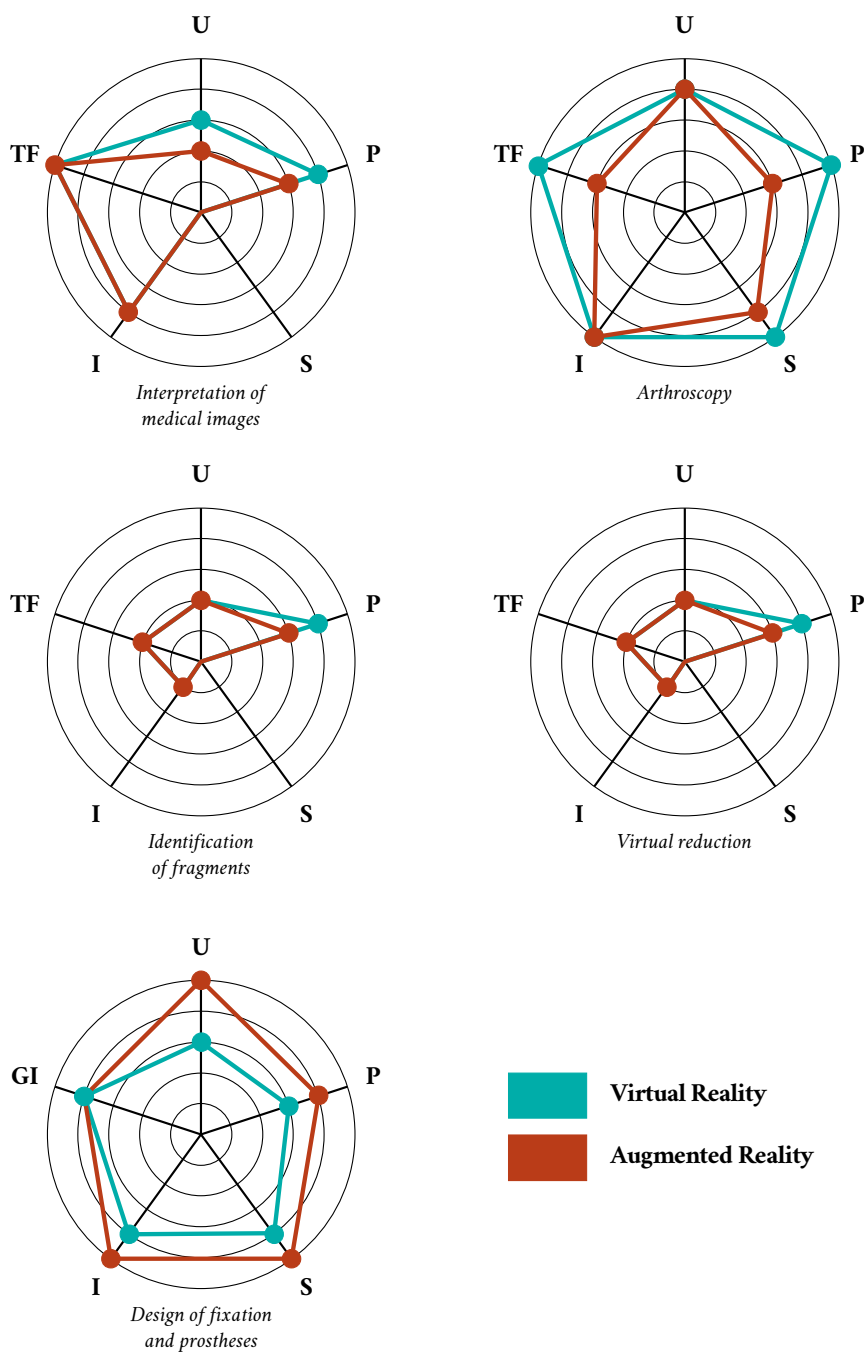


Figure 9. Plots regarding the current state of VR and AR in tasks before surgery
 U: Usefulness, P: Power, S: Sensations, I: Interaction, TF: Technological fulfillment

Performance is critical for immersive systems, especially in medical environments, since it requires detailed models of the anatomy. For instance, a representation of the legs of *The Visible Human Project* [117] in its highest quality version takes 6.77 gigabytes of memory at once (9.96 MB/image with 680 slices). Therefore, it is necessary to put special attention in optimization techniques. Nonetheless, in spite of the referred processing requirements, we consider that existing computing power is sufficient for diagnosis since medical images are partially discarded to enhance the visualization of specific regions.

Finally, a correct previous design of the prosthesis represents a crucial phase to reduce surgical time. The scientific community proposed two forms of action:

- Pure virtual environments with haptic devices.
- 3D printed bones.

If a virtual environment is used, then the injured bone must be accurately represented, but as previously mentioned, it could bring performance issues. Thus, the quality and variety of sensations is a common concern regarding virtual reality. Alternatively, 3D printing is a hotfix to the complexity of sensations in VR, as it can represent organs with enough precision, especially by employing heterogeneous materials [118]. Combined with AR, 3D printing allows the surgeon to simulate touching the human body with a reasonable realism.

3.1.2. During surgery

Currently, virtual reality focuses on training systems, being unusable during surgery as it cannot expose live information to the surgeon. Figure 10 reveals high values in augmented reality during surgery and a low fulfillment. These results indicate that the technology is ready, but the tasks have not been explored yet.

Any task performed in the operating theatre is trainable, e.g., tissue cutting, bone fragment manipulation, drilling, among others. Haptic devices are an important aspect as they represent the instruments involved. Again, the sensations provided to the surgeon remain a critical feature to make useful simulators.

Furthermore, virtual reality can be indirectly implanted in surgery by robots in the future. Thus, automatic virtual alignments could be implemented to autonomously reduce a fracture. Although stand-alone systems cannot be currently employed for complex procedures, they help the surgeon to perform several unnatural movements [119, 120]. Robots perceive real stimuli and recreate them as a virtual world, providing feedback to the surgeon via haptic devices.

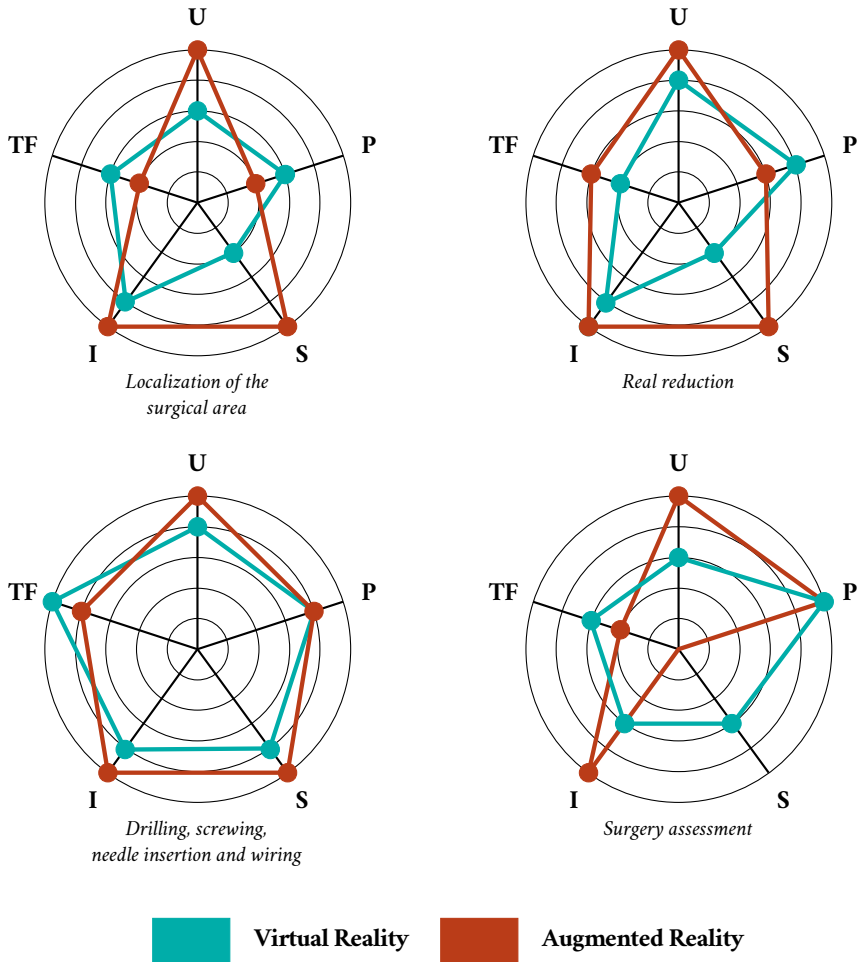


Figure 10. Plots regarding the current state of VR and AR in tasks during surgery
 U: Usefulness. P: Power. S: Sensations. I: Interaction. TF: Technological fulfillment

On the other side, augmented reality focuses on surgical assistants. In this context, registering the real world and the patient's body becomes a real-time requirement. This kind of registration of deformable objects is an open issue and requires many improvements to be applied in a computer-assisted surgery scenario. It is inherently related to markerless augmented reality, as it demands to directly register the human body by recognizing anatomical structures. This paradigm is currently a trending topic for surgical assistants, also reducing the intrusion in the procedure as implanted markers are not required [121, 122]. However, because initial medical images must be continuously refreshed to

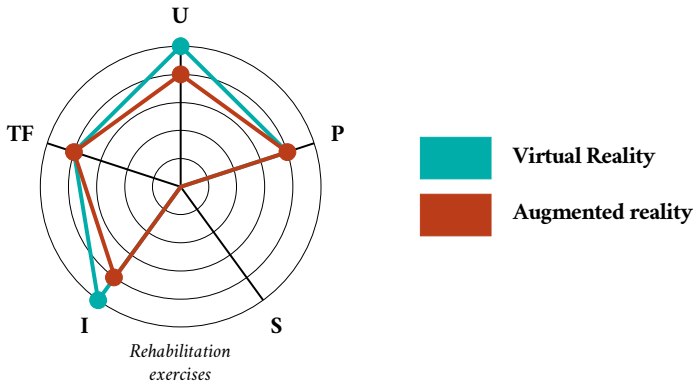


Figure 11. Plots regarding the current state of VR and AR in tasks after surgery
 U: Usefulness. P: Power. S: Sensations. I: Interaction. TF: Technological fulfillment

properly feed the augmented reality system, new CT or MRI scans are now mandatory, being currently unavailable due to excessive radiation.

AR is also used as an alternative to VR for training systems. Combined with 3D printing, this technology replicates human organs, allowing the surgeon to learn by manipulating them. A set of sensors captures traditional instruments in real time. Visual guidance is also added to the scene similarly to surgical assistants.

3.1.3. Post-surgery

Despite the number of studies regarding virtual reality-based rehabilitation platforms in other disciplines [22], we found a lack of work focusing on orthopedics. This kind of exercises requires monitoring, since physicians need to comprehend the current state of a patient and their progress. Provided feedback guarantees a daily monitoring if required. The usage of virtual and augmented reality systems decreases recovery time and cost, achieving a more effective rehabilitation [123]. The rise of serious games has allowed VR/AR applications to become more present in this type of treatments [124].

Telerehabilitation represents a trending field for the application of virtual and augmented reality environments, as patients can perform exercises at home, assisted by a specialist if needed. From our perspective, we recommend the reader to focus on motor rehabilitation using VR by importing techniques from other medical disciplines.

Current challenges of these systems are the required power, the realism of sensations and the smoothness of the interaction, besides the precision and valid

registration of movements (see Figure 11). These problems will be progressively solved with new technological advances: faster data connections, more powerful devices, etc.

Future trends could attach implantable sensors to the patient's bone to monitor forces and tensions enabling an early detection of abnormal behaviors of the biomechanical equilibrium.

3.2. Minimally invasive fracture reduction surgery (MIPO)

As mentioned before, we have studied minimally invasive fracture reduction surgery, through the assessment of anatomical bone landmarks. A side-by-side comparison was carried out to analyze the quality of the reduction. Finally, it was tested under a training simulator of a specific MIPO procedure.

The study of the location of landmarks, regions and geometrical properties of the humerus has allowed to correctly classify into valid or poor reduced fractures using contralateral templates.

Most of the landmarks offer important clues about the bone fragments position. On the contrary, others provide insufficient information, e.g., humeral shaft angles and the head radius delta. Each metric can individually give hints about the cause of the fracture. For instance, if the epicondyles are inversely displaced, we can suspect a rotation and then, the possible ways of action. Additionally, the combination of multiple metrics provides more feasible and robust results, contributing to the final decision of the quality of the reduction.

The proposed technique is sensitive to certain landmarks that cannot be labeled as basic types (distance, angle, area or volume). This is the case of the bicipital groove, classified as a point rather than a notch, causing disperse measurements (2.4 mm with $p < 0.01$). Nevertheless, this precision is acceptable as minimally invasive humerus surgical procedures accept higher levels of malrotation [88]. In any case, a good resolution and an adequate segmentation of the initial mesh are required to ensure reliable results.

Regarding the training simulator, we have observed a high learning rate. As users repeated the simulation, the results tended to improve. Consequently, it is expected to minimize the risk of the patient during the intervention as well as to improve the accuracy of the reduction. In fact, the performed usability survey reveals promising results, both in usefulness and performance.

3.3. Diagnosis, treatment and rehabilitation exercises of disorders related to body balance

In this part, a virtual reality system has been proposed for the treatment and rehabilitation of body balance disorders. The system is simple, flexible and inexpensive, allowing to implement multiple visual tests.

Obtained results reveal the validity of the device for a clinical usage, as confirms the following works [125, 126]. Its main advantage is its versatility since it allows to implement new tests and perception-related rehabilitation exercises easily. Using a mobile device also has the advantage of allowing the distribution of Google Cardboard-based headsets for rehabilitation of patients at home. The specialist can simultaneously, check patient information (results, executions, repetitions, etc.) through a web application in a simple and intuitive way.

Likewise, its architecture can be extended by employing wearable devices, allowing to monitor several vitals and indicators while performing rehabilitation exercises. As a result, a specialist can monitor the evolution of the rehabilitation, for instance, to follow up after surgery.

4. Conclusions and future work

Finally, this section concludes the research conducted and globally analyzes its main proposals, providing the reader with some open lines. Moreover, additional publications are listed.

During the research, the contribution of virtual and augmented reality to medicine has been formalized, mainly focusing on orthopedic trauma surgery. One of the goals of this task is introducing the reader in the current use and future trends of these technologies for diagnosis, treatment and rehabilitation. A set of starting points are proposed for novel researchers to enter in this unexplored field. In addition, several techniques from other disciplines that can be imported to orthopedic trauma surgery are described.

Based on the gaps found in the literature, the exploration of novel approaches regarding minimally invasive fracture reduction surgery was considered. We put special interest in MIPO procedures. In that case, it is crucial to design a digital representation of the human body which can be interpreted by computer applications. A compact and effective representation is achieved by the detection of landmarks and anatomical regions in order to analyze the progress or real-time evaluation of a surgical intervention.

The new minimally invasive surgical approaches require certain training, because of their novelty. The development of simulators represents a step forward to save time and reduce effort: a particular procedure will require a lower number of cadavers or specific mannequins. Nonetheless, as discussed along this thesis, interaction paradigms in VR does not completely satisfy the requirements of medical applications. Therefore, we proposed a simulator with a novel interaction paradigm which allows to relocate bone fragments in a realistic way.

Note that, we have focused this part on the assessment of landmarks applied to supracondylar humerus fractures. However, the described approach can be extended to other long bones.

Finally, we have also detected a lack of standardization in other medical disciplines. Virtual reality allows to simulate multiple visual tests in one single and much cheaper device than the set equivalent traditional instruments in many cases. Additionally, these devices can be easily integrated in the so-called Internet of Things, producing, finally, ubiquitous systems, in where patients can be followed by a specialist in a secure and controlled environment, e.g., from home.

4.1. Future work

Summarizing, as a result of this research, the following lines are left open:

- Import more techniques from minimally invasive procedures to orthopedic trauma surgery.
- Extend the geometrical detection of humeral landmarks to other type of long bone (healthy or fractured).
- Consider additional kind of fractures, further than supracondylar humerus fractures.
- Simulate other types of fractures which can be fixed by a MIPO approach.
- Develop more distributed diagnostic tests, treatments and rehabilitation exercises of disorders related to body balance.

4.2. Additional publications

- José Negrillo, Rafael J. Segura, Antonio J. Rueda, and Carlos J. Ogayar, “Sistema inmersivo para la medición de la Vertical Visual Subjetiva,” in III Jornadas Andaluzas de Informática (JAI2017), 2017, pp. 10–13.

- José Negrillo, Juan R. Jiménez, and Francisco R. Feito, “A Usability Study for a Novel Approach to Virtual Reality Interaction,” in Spanish Computer Graphics Conference (CEIG), 2018.
- José Negrillo-Cárdenas, Juan-Roberto Jiménez-Pérez, and Francisco R. Feito, “Automatic Detection of Distal Humerus Features: First Steps,” in Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, 2019, pp. 354–359.
- José Negrillo-Cárdenas, “Estudio geométrico sobre modelos óseos humanos” in Jornadas de Innovación en Docencia e Investigación en Informática Gráfica y Realidad Virtual, 2019.
- Intellectual property registration: “Sistema de realidad virtual para detección y tratamiento de las patologías posturales y del equilibrio” © Rafael Lomas Vega, Rafael Jesús Segura Sánchez, Francisco Javier Molina Ortega, Carlos Javier Ogáyar Anguita, Antonio Jesús Rueda Ruiz, José Negrillo Cárdenas, Daniel Rodríguez Almagro, Safe Creative. ID: 1901249725473, 24 enero 2019.

Bibliografía

- [1] F. P. Vidal *et al.*, “Principles and Applications of Computer Graphics in Medicine,” *Comput. Graph. Forum*, vol. 25, no. 1, pp. 113–137, Mar. 2006.
- [2] R. A. Brooks and G. Di Chiro, “Principles of computer assisted tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 21, no. 5, p. 001, Sep. 1976.
- [3] J. J. Jiménez-Delgado, F. Paulano-Godino, R. PulidoRam-Ramírez, and J. R. Jiménez-Pérez, “Computer assisted preoperative planning of bone fracture reduction: Simulation techniques and new trends,” *Med. Image Anal.*, vol. 30, pp. 30–45, 2016.
- [4] D. Chatzopoulos, C. Bermejo, Z. Huang, and P. Hui, “Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6917–6950, 2017.
- [5] T. Parisi, *Learning Virtual Reality: Developing Immersive Experiences and Applications for Desktop, Web, and Mobile*. O’Reilly Media, Incorporated, 2015.
- [6] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, “Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum,” 1995, vol. 2351, pp. 2311–2351.
- [7] A. Rafii and T. Zuccarino, “Method and system enabling natural user interface gestures with user wearable glasses,” US8836768B1, 2012.
- [8] M. A. Zielke *et al.*, “Developing Virtual Patients with VR/AR for a natural user interface in medical teaching,” in *2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, 2017, pp. 1–8.
- [9] J. J. LaViola, E. Kruijff, R. P. McMahan, D. Bowman, and I. P. Poupyrev, *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Pearson Education, 2017.

- [10] J. D. Foley, V. L. Wallace, and P. Chan, "The human factors of computer graphics interaction techniques," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 4, no. 11, pp. 13–48, Nov. 1984.
- [11] M. M. Davis, J. L. Gabbard, D. A. Bowman, and D. Gracanin, "Depth-based 3D gesture multi-level radial menu for virtual object manipulation," in *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, 2016, pp. 169–170.
- [12] S. Aukstakalnis, *Practical Augmented Reality: A Guide to the Technologies, Applications, and Human Factors for AR and VR*. Addison-Wesley, 2016.
- [13] T. R. Coles, D. Meglan, and N. W. John, "The role of haptics in medical training simulators: A survey of the state of the art," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 4, no. 1, pp. 51–66, 2011.
- [14] I. Choi, E. W. Hawkes, D. L. Christensen, C. J. Ploch, and S. Follmer, "Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 986–993.
- [15] Y. ~J. Nam, M. ~K. Park, and R. Yamane, "Smart glove: hand master using magnetorheological fluid actuators," in *ICMIT 2007: Mechatronics, MEMS, and Smart Materials*, 2007, vol. 6794, p. 679434.
- [16] K. Koyanagi, Y. Fujii, and J. Furusho, "Development of VR-STEF System with Force Display Glove System," in *Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-existence*, 2005, pp. 91–97.
- [17] M. C. Ling and M. A. Otaduy, *Haptic rendering: foundations, algorithms, and applications*. Wellesley, Mass: A.K. Peters, 2008.
- [18] C. Telkenaroglu and T. Capin, "Dual-finger 3D interaction techniques for mobile devices," *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 17, no. 7, pp. 1551–1572, 2013.
- [19] J. R. Jiménez-Pérez, F. Paulano-Godino, J. M. Noguera, and J. J. Jiménez-Delgado, "Mobile devices in the context of bone fracture reduction: challenges and opportunities," *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng. Imaging Vis.*, vol. 1163, no. December, pp. 1–8, 2016.
- [20] S. M. McPhail, M. O'Hara, E. Gane, P. Tonks, J. Bullock-Saxton, and S. S. Kuys, "Nintendo Wii Fit as an adjunct to physiotherapy following lower limb fractures: preliminary feasibility, safety and sample size considerations," *Physiotherapy*, vol. 102, no. 2, pp. 217–220, 2016.

-
- [21] J. Grubert, Y. Itoh, K. Moser, and J. E. Swan, "A Survey of Calibration Methods for Optical See-Through Head-Mounted Displays," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 24, no. 9, pp. 2649–2662, Sep. 2018.
- [22] L. Li *et al.*, "Application of virtual reality technology in clinical medicine," *Am. J. Transl. Res.*, vol. 9, no. 9, pp. 3867–3880, 2017.
- [23] D. Schmalstieg and T. Höllerer, *Augmented Reality: Principles and Practice*, 1st ed. Addison-Wesley Educational Publishers, 2016.
- [24] S. Ilango, M. Knöchelmann, L. A. Kahrs, A. Wolf, T. Ortmaier, and R. Lachmayer, "User evaluation study on illumination requirements to design an augmented reality projector for open liver surgery," in *Illumination Optics V*, 2018, vol. 10693, p. 27.
- [25] M. Krichenbauer, G. Yamamoto, T. Taketomi, C. Sandor, and H. Kato, "Augmented Reality vs Virtual Reality for 3D Object Manipulation," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 24, no. 2, pp. 1038–1048, 2017.
- [26] B. Lawson, "Motion Sickness Symptomatology and Origins," CRC Press, 2014, pp. 531–600.
- [27] R. Held and N. Durlach, "Telepresence, time delay, and adaptation," *NASA Conf. Publ. 10032*, no. January 1993, 1989.
- [28] J. M. Noguera and J. R. Jimenez, "Mobile Volume Rendering: Past, Present and Future," *Vis. Comput. Graph. IEEE Trans.*, vol. 22, no. 2, pp. 1164–1178, 2016.
- [29] S. B. Most, "What's 'inattentive' about inattentive blindness?," *Conscious. Cogn.*, vol. 19, no. 4, pp. 1102–1104, 2010.
- [30] D. J. Simons and C. F. Chabris, "Gorillas in our midst: sustained inattentive blindness for dynamic events.," *Perception*, vol. 28, no. 9, pp. 1059–1074, 1999.
- [31] D. D. Ruikar, R. S. Hegadi, and K. C. Santosh, "A Systematic Review on Orthopedic Simulators for Psycho-Motor Skill and Surgical Procedure Training," *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 9, p. 168, Sep. 2018.
- [32] N. Vaughan, V. N. Dubey, T. W. Wainwright, and R. G. Middleton, "A review of virtual reality based training simulators for orthopaedic surgery," *Med. Eng. Phys.*, vol. 38, no. 2, pp. 59–71, 2016.
- [33] D. Escobar-Castillejos, J. Noguez, L. Neri, A. Magana, and B. Benes, "A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training," *J. Med.*

- Syst.*, vol. 40, no. 4, pp. 1–22, 2016.
- [34] P. Vávra *et al.*, “Recent Development of Augmented Reality in Surgery: A Review,” *J. Healthc. Eng.*, vol. 2017, pp. 1–9, 2017.
- [35] S. Bernhardt, S. A. Nicolau, L. Soler, and C. Doignon, “The status of augmented reality in laparoscopic surgery as of 2016,” *Med. Image Anal.*, vol. 37, pp. 66–90, 2017.
- [36] A. Meola, F. Cutolo, M. Carbone, F. Cagnazzo, M. Ferrari, and V. Ferrari, “Augmented reality in neurosurgery: a systematic review,” *Neurosurgical Review*, vol. 40, no. 4, 2017.
- [37] P. Neudeck and H.-U. Wittchen, Eds., *Exposure Therapy Rethinking the Model - Refining the Method*, 1st ed. 20. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [38] D. Horváthová and V. Siládi, “Creating virtual environments for phobia treatment,” *Open Comput. Sci.*, vol. 6, no. 1, 2016.
- [39] G. Lorenzo, A. Lledó, J. Pomares, and R. Roig, “Design and application of an immersive virtual reality system to enhance emotional skills for children with autism spectrum disorders,” *Comput. Educ.*, vol. 98, no. Supplement C, pp. 192–205, 2016.
- [40] H. G. Hoffman, D. R. Patterson, and G. J. Carrougher, “Use of virtual reality for adjunctive treatment of adult burn pain during physical therapy: a controlled study,” *Clin. J. Pain*, vol. 16, no. 3, pp. 244–250, Sep. 2000.
- [41] H. G. Hoffman, J. N. Doctor, D. R. Patterson, G. J. Carrougher, and T. A. 3rd Furness, “Virtual reality as an adjunctive pain control during burn wound care in adolescent patients,” *Pain*, vol. 85, no. 1–2, pp. 305–309, Mar. 2000.
- [42] A. Pourmand, S. Davis, A. Marchak, T. Whiteside, and N. Sikka, “Virtual Reality as a Clinical Tool for Pain Management,” *Curr. Pain Headache Rep.*, vol. 22, no. 8, p. 53, Aug. 2018.
- [43] B. Garrett, T. Taverner, and P. McDade, “Virtual Reality as an Adjunct Home Therapy in Chronic Pain Management: An Exploratory Study,” *JMIR Medical Informatics*, vol. 5, no. 2. Toronto, Canada, 2017.
- [44] V. C. Tashjian *et al.*, “Virtual Reality for Management of Pain in Hospitalized Patients: Results of a Controlled Trial,” *JMIR Mental Health*,

- vol. 4, no. 1. Toronto, Canada, 2017.
- [45] J. Negrillo-Cárdenas, A. J. Rueda-Ruiz, C. J. Ogayar-Angueta, R. Lomas-Vega, and R. J. Segura-Sánchez, “A System for the Measurement of the Subjective Visual Vertical using a Virtual Reality Device,” *J. Med. Syst.*, vol. 42, no. 7, p. 124, May 2018.
- [46] I. Ulozienė *et al.*, “Subjective visual vertical assessment with mobile virtual reality system,” *Medicina (B. Aires)*, vol. 53, no. 6, pp. 394–402, 2017.
- [47] S. Cho *et al.*, “Development of virtual reality proprioceptive rehabilitation system for stroke patients,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 113, no. 1, pp. 258–265, 2014.
- [48] K. Gurusamy, R. Aggarwal, L. Palanivelu, and B. R. Davidson, “Systematic review of randomized controlled trials on the effectiveness of virtual reality training for laparoscopic surgery,” *Br. J. Surg.*, vol. 95, no. 9, pp. 1088–1097, Sep. 2008.
- [49] N. E. Seymour *et al.*, “Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study.,” *Ann. Surg.*, vol. 236, no. 4, pp. 458–63; discussion 463–4, Oct. 2002.
- [50] Y. Kim, H. Kim, and Y. O. Kim, “Virtual reality and augmented reality in plastic surgery: A review,” *Arch. Plast. Surg.*, vol. 44, no. 3, pp. 179–187, 2017.
- [51] F. Cutolo, M. Carbone, P. D. Parchi, V. Ferrari, M. Lisanti, and M. Ferrari, “Application of a New Wearable Augmented Reality Video See-Through Display to Aid Percutaneous Procedures in Spine Surgery,” in *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, 2016, vol. 9769, pp. 43–54.
- [52] J. W. Yoon *et al.*, “Augmented reality for the surgeon: Systematic review,” *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, no. March, pp. 1–13, 2018.
- [53] L. Besharati Tabrizi and M. Mahvash, “Augmented reality–guided neurosurgery: accuracy and intraoperative application of an image projection technique,” *J. Neurosurg.*, vol. 123, no. 1, pp. 206–211, Mar. 2015.
- [54] C. Bichlmeier, F. Wimmer, S. M. Heining, and N. Navab, “Contextual Anatomic Mimesis Hybrid In-Situ Visualization Method for Improving Multi-Sensory Depth Perception in Medical Augmented Reality,” in *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2007, pp. 129–138.

- [55] P. Pessaux, M. Diana, L. Soler, T. Piardi, D. Mutter, and J. Marescaux, "Towards cybernetic surgery: robotic and augmented reality-assisted liver segmentectomy," *Langenbeck's Arch. Surg.*, vol. 400, no. 3, pp. 381–385, Apr. 2015.
- [56] B. Fida, F. Cutolo, G. di Franco, M. Ferrari, and V. Ferrari, "Augmented reality in open surgery," *Updates Surg.*, vol. 70, no. 3, pp. 389–400, Sep. 2018.
- [57] J. Grudin, "Computer-supported cooperative work: history and focus," *Computer (Long Beach, Calif.)*, vol. 27, no. 5, pp. 19–26, May 1994.
- [58] E. Rojas-Muñoz *et al.*, "Augmented Reality as a Medium for Improved Telementoring," *Mil. Med.*, vol. 184, no. Supplement_1, pp. 57–64, Mar. 2019.
- [59] J. Cecil, A. Gupta, M. Pirela-Cruz, and P. Ramanathan, "A Network-Based Virtual Reality Simulation Training Approach for Orthopedic Surgery," *ACM Trans. Multimed. Comput. Commun. Appl.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–21, Aug. 2018.
- [60] J. Cecil, A. Gupta, P. Ramanathan, and M. Pirela-Cruz, "A distributed collaborative simulation environment for orthopedic surgical training," *11th Annu. IEEE Int. Syst. Conf. SysCon 2017 - Proc.*, 2017.
- [61] A. Gupta, J. Cecil, M. Pirela-Cruz, and P. Ramanathan, "A Virtual Reality Enhanced Cyber-Human Framework for Orthopedic Surgical Training," *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 3501–3512, Sep. 2019.
- [62] J. Cecil, P. Ramanathan, V. Rahneshin, A. Prakash, and M. Pirela-Cruz, "Collaborative virtual environments for orthopedic surgery," in *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2013, pp. 133–137.
- [63] D. Johnson, *Mobile Support in CSCW Applications and Groupware Development Frameworks*, vol. 7. 2013.
- [64] M. B. Shenai *et al.*, "Virtual Interactive Presence and Augmented Reality (VIPAR) for Remote Surgical Assistance," *Oper. Neurosurg.*, vol. 68, no. suppl_1, pp. ons200–ons207, 2011.
- [65] M. Carbone, C. Freschi, S. Mascioli, and V. Ferrari, "A Wearable Augmented Reality Platform for Telemedicine," in *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, 2016, vol. 9769, pp. 92–100.

- [66] F. Paulano-Godino and J. J. Jiménez-Delgado, "Identification of fracture zones and its application in automatic bone fracture reduction," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 141, pp. 93–104, 2017.
- [67] T. Albrecht and T. Vetter, "Automatic Fracture Reduction," in *Workshop on Mesh Processing in Medical Image Analysis*, Springer, 2012, pp. 22–29.
- [68] X. B. Wu *et al.*, "Printed three-dimensional anatomic templates for virtual preoperative planning before reconstruction of old pelvic injuries: Initial results," *Chin. Med. J. (Engl.)*, vol. 128, no. 4, pp. 477–482, 2015.
- [69] P. Honigmann, N. Sharma, B. Okolo, U. Popp, B. Msallem, and F. M. Thieringer, "Patient-Specific Surgical Implants Made of 3D Printed PEEK: Material, Technology, and Scope of Surgical Application," *Biomed Res. Int.*, vol. 2018, pp. 1–8, Mar. 2018.
- [70] Y. Jun, K.-Y. Lee, K.-W. Gwak, and D. Lim, "Anatomic basis 3-D surgical simulation system for custom fit knee replacement," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 5, pp. 709–715, May 2012.
- [71] Y. Jun and S. Park, "Polygon-based 3D surgical planning system for hip operation," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 1, pp. 157–160, Feb. 2011.
- [72] N. Vaughan and V. N. Dubey, "Virtual Hip Replacement Simulator for 3D Printed Implants," in *2017 Design of Medical Devices Conference*, 2017, p. V001T09A011.
- [73] A. S. Chowdhury, S. M. Bhandarkar, R. W. Robinson, and J. C. Yu, "Virtual multi-fracture craniofacial reconstruction using computer vision and graph matching," *Comput. Med. Imaging Graph.*, vol. 33, no. 5, pp. 333–342, Jul. 2009.
- [74] Y. Sato *et al.*, "Intraoperative Simulation and Planning Using a Combined Acetabular and Femoral (CAF) Navigation System for Total Hip Replacement," in *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention -- MICCAI 2000: Third International Conference, Pittsburgh, PA, USA, October 11-14, 2000. Proceedings*, S. L. Delp, A. M. DiGoia, and B. Jaramaz, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, pp. 1114–1125.
- [75] B. Liu *et al.*, "Virtual plate pre-bending for the long bone fracture based on axis pre-alignment," *Comput. Med. Imaging Graph.*, vol. 38, no. 4, pp. 233–244, 2014.
- [76] A. D. Delgado Martínez, *Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 4th ed.

- Editorial Médica Paramericana, 2018.
- [77] G. O. Tong and S. Bavonratanavech, *Minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO)*, 1st ed. Stuttgart: Thieme, 2007.
- [78] M. E. Müller, P. Koch, S. Nazarian, and J. Schatzker, *The Comprehensive Classification of Fractures of Long Bones*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [79] C. P. McDonald, T. M. Peters, G. J. W. King, and J. A. Johnson, "Computer assisted surgery of the distal humerus can employ contralateral images for pre-operative planning, registration, and surgical intervention," *J. Shoulder Elb. Surg.*, vol. 18, no. 3, pp. 469–477, May 2009.
- [80] K.-N. An, "Biomechanics of the Elbow," *Morrey's Elb. its Disord.*, pp. 33–46, Jan. 2018.
- [81] A. J. Felstead and D. Ricketts, "Biomechanics of the shoulder and elbow," *Orthop. Trauma*, vol. 31, no. 5, pp. 300–305, Oct. 2017.
- [82] P. Boileau and G. Walch, "The three-dimensional geometry of the proximal humerus," *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 79-B, no. 5, pp. 857–865, Sep. 1997.
- [83] R. Shiba, C. Sorbie, D. W. Siu, J. T. Bryant, T. D. V Cooke, and H. W. Wevers, "Geometry of the humeroulnar joint," *J. Orthop. Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 897–906, Nov. 1988.
- [84] J. T. London, "Kinematics of the elbow.," *J. Bone Jt. Surg.*, vol. 63, no. 4, pp. 529–535, Apr. 1981.
- [85] P. Stefan, J. Traub, C. Hennesperger, M. Esposito, and N. Navab, "Challenges in Computer Assisted Interventions," in *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*, Elsevier, 2020, pp. 979–1012.
- [86] H. Cañada-Oya, S. Cañada-Oya, C. Zarzuela-Jiménez, and A. D. Delgado-Martinez, "New, Minimally Invasive, Anteromedial-Distal Approach for Plate Osteosynthesis of Distal-Third Humeral Shaft Fractures," *JBJS Open Access*, vol. 5, no. 1, p. e0056, 2020.
- [87] F. Li *et al.*, "Comparison between minimally invasive plate osteosynthesis and open reduction-internal fixation for proximal humeral fractures: a meta-analysis based on 1050 individuals," *BMC Musculoskelet. Disord.*, vol. 20, no. 1, p. 550, Dec. 2019.

- [88] C. Wang, J. Li, Y. Li, G. Dai, and M. Wang, "Is minimally invasive plating osteosynthesis for humeral shaft fracture advantageous compared with the conventional open technique?," *J. Shoulder Elb. Surg.*, vol. 24, no. 11, pp. 1741–1748, Nov. 2015.
- [89] G. Litjens *et al.*, "A survey on deep learning in medical image analysis," *Medical Image Analysis*. 2017.
- [90] J. R. Brownhill, G. J. W. King, and J. A. Johnson, "Morphologic analysis of the distal humerus with special interest in elbow implant sizing and alignment," *J. Shoulder Elb. Surg.*, vol. 16, no. 3, pp. S126–S132, May 2007.
- [91] V. Ramirez, E. Johnson, C. Gonzalez, V. Ramirez, B. Rubino, and G. Rossetti, "Assessing the Use of Mobile Health Technology by Patients: An Observational Study in Primary Care Clinics," *JMIR mHealth uHealth*, vol. 4, no. 2, p. e41, Apr. 2016.
- [92] L. U. Hernandez-Munoz *et al.*, "Evaluation of AllergiSense Smartphone Tools for Adrenaline Injection Training," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 21, no. 1, pp. 272–282, 2017.
- [93] A. Abushakra and M. Faezipour, "Augmenting breath regulation using a mobile driven virtual reality therapy framework," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 746–752, 2014.
- [94] S. Cho *et al.*, "Development of virtual reality proprioceptive rehabilitation system for stroke patients," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 113, no. 1, pp. 258–265, 2014.
- [95] A. M. Bronstein, L. Yardley, A. P. Moore, and L. Cleeves, "Visually and posturally mediated tilt illusion in Parkinson's disease and in labyrinthine defective subjects," *Neurology*, vol. 47, no. 3, pp. 651–656, 1996.
- [96] C. Piscicelli and D. Pérennou, "Visual verticality perception after stroke: A systematic review of methodological approaches and suggestions for standardization," *Ann. Phys. Rehabil. Med.*, 2016.
- [97] D. Pérennou, C. Piscicelli, G. Barbieri, M. Jaeger, A. Marquer, and J. Barra, "Measuring verticality perception after stroke: Why and how?," *Neurophysiol. Clin. Neurophysiol.*, vol. 44, no. 1, pp. 25–32, 2014.
- [98] A. Serra, J. Derwenskus, D. L. Downey, and R. J. Leigh, "Role of eye movement examination and subjective visual vertical in clinical evaluation of multiple sclerosis," *J. Neurol.*, vol. 250, no. 5, pp. 569–575, May 2003.

- [99] L. Crevits, J. Venhovens, J. Vanoutrive, and J. Debruyne, "False perception of visual verticality in multiple sclerosis," *Eur. J. Neurol.*, vol. 14, no. 2, pp. 228–232, 2007.
- [100] S. M. Hong, M. S. Park, C. I. Cha, C. H. Park, and J. H. Lee, "Subjective visual vertical during eccentric rotation in patients with benign paroxysmal positional vertigo," *Otol. Neurotol.*, vol. 29, no. 8, pp. 1167–1170, 2008.
- [101] R. M. Gall, D. J. Ireland, and D. D. Robertson, "Subjective visual vertical in patients with benign paroxysmal positional vertigo," *J Otolaryngol*, vol. 28, no. 3, pp. 162–165, Jun. 1999.
- [102] A. Bohmer and J. Rickenmann, "The subjective visual vertical as a clinical parameter of vestibular function in peripheral vestibular diseases," *J Vestib Res*, vol. 5, no. 1, pp. 35–45, 1995.
- [103] A. H. Fard, N. Yazdani, N. Rezazadeh, M. S. Alborzi, and A. A. Bagheban, "Subjective visual vertical in patients with unilateral definite Meniere's diseases," *Audit. Vestib. Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 105–111, 2017.
- [104] H. Kumagami *et al.*, "Subjective Visual Vertical in Acute Attacks of Meniere's Disease," *Otol. Neurotol.*, vol. 30, pp. 206–209, 2009.
- [105] M. Pavlou, "The Use of Optokinetic Stimulation in Vestibular Rehabilitation," *J. Neurol. Phys. Ther.*, vol. 34, no. 2, pp. 105–110, Jun. 2010.
- [106] J. F. Hejtmancik, P. Cabrera, Y. Chen, O. M'Hamdi, and J. M. Nickerson, "Vision," in *Conn's Translational Neuroscience*, Elsevier, 2017, pp. 399–438.
- [107] A. Zwergal, N. Rettinger, C. Frenzel, M. Dieterich, T. Brandt, and M. Strupp, "A bucket of static vestibular function," *Neurology*, vol. 72, no. 19, pp. 1689–1692, 2009.
- [108] A. Saj, J. Honoré, Y. Coello, and M. Rousseaux, "The visual vertical in the pusher syndrome," *J. Neurol.*, vol. 252, no. 8, pp. 885–891, 2005.
- [109] A. Saj, J. Honoré, T. Bernati, Y. Coello, and M. Rousseaux, "Subjective Visual Vertical in Pitch and Roll in Right Hemispheric Stroke," *Stroke*, vol. 36, no. 3, pp. 588–591, 2005.
- [110] A. Saj, J. Honoré, J. Davroux, Y. Coello, and M. Rousseaux, "Effect of Posture on the Perception of Verticality in Neglect Patients," *Stroke*, vol. 36, no. 10, pp. 2203–2205, 2005.
- [111] V. Koppelmans *et al.*, "Study protocol to examine the effects of spaceflight

- and a spaceflight analog on neurocognitive performance: extent, longevity, and neural bases,” *BMC Neurol*, vol. 13, p. 205, 2013.
- [112] D. A. Perennou *et al.*, “Lateropulsion, pushing and verticality perception in hemisphere stroke: a causal relationship?,” *Brain*, vol. 131, no. 9, pp. 2401–2413, 2008.
- [113] I. V Bonan, K. Hubeaux, M. C. Gellez-Leman, J. P. Guichard, E. Vicaut, and A. P. Yelnik, “Influence of subjective visual vertical misperception on balance recovery after stroke,” *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 78, no. 1, pp. 49–55, 2006.
- [114] E. Chiarovano, L. A. McGarvie, D. Szmulewicz, and H. G. MacDougall, “Subjective visual vertical in virtual reality (Curator SVV): validation and normative data,” *Virtual Real.*, vol. 22, no. 4, pp. 315–320, Nov. 2018.
- [115] L. F. Cocco, J. A. Yazzigi, E. F. K. I. Kawakami, H. J. F. Alvachian, F. B. dos Reis, and M. V. M. Luzo, “Inter-observer reliability of alternative diagnostic methods for proximal humerus fractures: a comparison between attending surgeons and orthopedic residents in training,” *Patient Saf. Surg.*, vol. 13, no. 1, p. 12, Dec. 2019.
- [116] P. M. Maloca *et al.*, “High-Performance Virtual Reality Volume Rendering of Original Optical Coherence Tomography Point-Cloud Data Enhanced With Real-Time Ray Casting,” *Transl. Vis. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 4, p. 2, Jul. 2018.
- [117] M. J. Ackerman, “The visible human project,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 3, pp. 504–511, 1998.
- [118] Y. Zou *et al.*, “The precision and reliability evaluation of 3-dimensional printed damaged bone and prosthesis models by stereo lithography appearance,” *Med. (United States)*, vol. 97, no. 6, pp. 1–6, 2018.
- [119] H. Azimian, “Chapter 5 - Surgical Robotic Tools,” in *Bioengineering for Surgery*, W. A. Farhat and J. Drake, Eds. Chandos Publishing, 2016, pp. 91–112.
- [120] G. P. Moustris, S. C. Hiridis, K. M. Deliparaschos, and K. M. Konstantinidis, “Evolution of autonomous and semi-autonomous robotic surgical systems: a review of the literature,” *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, vol. 7, no. 4, pp. 375–392, Dec. 2011.
- [121] J. Wang, Y. Shen, and S. Yang, “A practical marker-less image registration method for augmented reality oral and maxillofacial surgery,” *Int. J.*

Comput. Assist. Radiol. Surg., vol. 14, no. 5, pp. 763–773, May 2019.

- [122] X. Zhang *et al.*, “A markerless automatic deformable registration framework for augmented reality navigation of laparoscopy partial nephrectomy,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, no. 0123456789, Apr. 2019.
- [123] G. C. Burdea, “Virtual rehabilitation--benefits and challenges,” *Methods Inf. Med.*, vol. 42, no. 5, pp. 519–23, 2003.
- [124] H. A. Meijer, M. Graafland, J. C. Goslings, and M. P. Schijven, “Systematic Review on the Effects of Serious Games and Wearable Technology Used in Rehabilitation of Patients With Traumatic Bone and Soft Tissue Injuries,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 99, no. 9, pp. 1890–1899, Sep. 2018.
- [125] A. Peinado-Rubia, M. C. Osuna-Pérez, D. Rodríguez-Almagro, N. Zagalaz-Anula, M. C. López-Ruiz, and R. Lomas-Vega, “Impaired Balance in Patients with Fibromyalgia Syndrome: Predictors of the Impact of This Disorder and Balance Confidence,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 9, p. 3160, May 2020.
- [126] I. Cortés-Pérez, F. A. Nieto-Escamez, and E. Obrero-Gaitán, “Immersive Virtual Reality in Stroke Patients as a New Approach for Reducing Postural Disabilities and Falls Risk: A Case Series,” *Brain Sci.*, vol. 10, no. 5, p. 296, May 2020.