



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



GRADO EN INGENIERÍA DE LA SALUD
MENCIÓN EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO DE CARACTERIZACIÓN
DE LA CINEMÁTICA RELATIVA ENTRE ELEMENTOS ÓSEOS
EN BASE A DATOS DE VIDEOGRAMETRÍA 3D

DEFINITION OF A PROTOCOL OF
CHARACTERIZATION OF THE RELATIVE
KINEMATICS BETWEEN BONE ELEMENTS BASED
ON 3D VIDEOGRAMMETRY DATA

Realizado por
ALEJANDRO PEÑA TRABALÓN

Tutorizado por
MARÍA PRADO NÓVOA

Departamento
INGENIERÍA MECÁNICA, TÉRMICA Y DE FLUIDOS
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

MÁLAGA, JUNIO 2020



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA
GRADUADO EN INGENIERÍA DE LA SALUD
MENCIÓN EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

**DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO DE
CARACTERIZACIÓN DE LA CINEMÁTICA
RELATIVA ENTRE ELEMENTOS ÓSEOS EN BASE
A DATOS DE VIDEOGRAMETRÍA 3D**

**DEFINITION OF A PROTOCOL OF
CHARACTERIZATION OF THE RELATIVE
KINEMATICS BETWEEN BONE ELEMENTS BASED
ON 3D VIDEOGRAMMETRY DATA**

Realizado por
Alejandro Peña Trabalón

Tutorizado por
María Prado Nóvoa

Departamento
Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
MÁLAGA, JUNIO DE 2020

Fecha defensa: Julio de 2020

A mi madre, por su apoyo, ser un ejemplo a seguir e
impulsarme a conseguir mis metas.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a María Prado Nóvoa su apoyo y ayuda durante la realización de este proyecto. Sin su confianza en mí y sus aportaciones no hubiera sido posible llevarlo a cabo.

También, junto a María, quisiera agradecer a Ana Pérez, la oportunidad que me dieron ambas de colaborar con el departamento, y todo lo que esto me ha aportado.

Resumen

El objetivo de este proyecto es la definición de un protocolo que permita la caracterización de la cinemática relativa entre elementos óseos en base a datos obtenidos de un sistema de videogrametría 3D. La caracterización del comportamiento cinemático de especímenes en ensayos de laboratorio es necesario en estudios de diferentes ámbitos, tales como el análisis de movimiento, la estabilidad en intervenciones quirúrgicas y la definición de protocolos, entre otros. Para ello, se ha desarrollado un software en MATLAB®, el cual, de forma conjunta con una serie de elementos, como modelos anatómicos, marcadores reflectantes, sistemas de iluminación con luz negra y dispositivos de captura de vídeo sincronizados, permite la obtención de las coordenadas tridimensionales de un conjunto de puntos de interés a estudiar en el modelo, los cuales son esenciales para analizar la cinemática de este con alta precisión. El uso de marcadores reflectantes y luz negra es un aspecto muy novedoso que hasta ahora no se había considerado de interés para este tipo de estudios. Además, con el fin de validar los resultados se han desarrollado dos sistemas de comprobación empleando el dispositivo háptico Phantom Omni y un software implementado en MATLAB® para conocer la precisión de detección de los marcadores. Adicionalmente, se ha realizado una adaptación del sistema de videogrametría empleando dispositivos móviles, con el fin de obtener una aplicación a nivel de usuario, que facilitara su uso y redujese los costes. Finalmente, los datos obtenidos servirán como referencia geométrica en el desarrollo de modelos de elementos finitos personalizados de las estructuras anatómicas entre las cuales se ha realizado el estudio.

Palabras clave: Videogrametría, cinemática, elementos óseos, marcadores reflectantes, luz negra.

Abstract

The objective of this project is the definition of a protocol that allows the characterization of relative kinematics between bone elements based on data obtained from a 3D videogrammetry system. Characterization of the kinematic behaviour of specimens in laboratory tests is necessary in studies in different fields, such as motion analysis, stability in surgical interventions and the definition of protocols, among others. To this end, a software has been developed in MATLAB®, which, in conjunction with a number of elements, such as anatomical models, reflective markers, black light lighting systems and synchronized video capture devices, allows the obtaining of the three-dimensional coordinates of a set of points of interest to be studied in the model, which are essential for analyzing the kinematics of this with high precision. The use of reflective markers and black light is a very novel aspect that until now had not been considered of interest to this type of studies. In order to validate the results, two testing systems have been developed using the Phantom Omni haptic device and a software implemented in MATLAB® to know the accuracy of marker detection. In addition, an adaptation of the videogrammetry system has been done using mobile devices, in order to obtain an application at user-level that facilitate its use and reduce costs. Finally, the data obtained will serve as a geometric reference in the development of custom finite elements models of the anatomical structures among which the study has been carried out.

Keywords: Videogrammetry, kinematics, bone elements, reflective markers, black light.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Tecnologías empleadas	3
1.4 Metodología.....	5
1.5 Estructura del proyecto	6
2. Desarrollo del sistema de videogrametría	9
2.1 Introducción a videogrametría.....	9
2.1.1 Principios de calibración en videogrametría	11
2.1.2 Calibración estéreo	12
2.2 Sistema de videogrametría.....	14
2.2.1 Materiales.....	14
2.2.2 Preparación del sistema.....	18
2.2.3 Funcionamiento del software.....	25
2.3 Marcadores reflectantes	29
2.4 Sistema de Iluminación	30
2.4.1 Diseño del sistema de iluminación	33
3. Validación del sistema	37
3.1 Dispositivo háptico.....	37
3.2 Precisión de detección de los marcadores.....	43
4. Adaptación del sistema de medida a registros con dispositivos móviles.....	47
4.1 Materiales	48
4.2 Preparación del sistema	50
4.3 Herramienta de sincronización de imágenes.....	54
5. Pruebas y resultados.....	61
6. Conclusiones y líneas futuras	71
Bibliografía.....	77

A. Manual de uso de la aplicación del dispositivo háptico	79
B. Protocolo de la aplicación del sistema de videogrametría	85
C. Código de MATLAB de la aplicación de seguimiento del sistema de videogrametría .	91
D. Código de MATLAB del sistema de sincronización de dispositivos móviles	97
E. Código de MATLAB del sistema de validación de la precisión en la detección de los marcadores	101
F. Presupuesto del sistema de iluminación	105
G. Plano de explosión del sistema de iluminación	107

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1. Esquema representativo del algoritmo de cálculo de los parámetros extrínsecos del sistema de dos cámaras.	13
Figura 2.2. Representación del sistema compuesto por dos cámaras, con la visualización de los planos de imagen, el sistema de referencia de cada una de ellas y el punto de interés a conocer sus coordenadas tridimensionales.	13
Figura 2.3. Dispositivos de captura de datos Digital Baumer VCXU-124C.	15
Figura 2.4. Trípodes MANFROTTO empleados para posicionar y orientar las cámaras.	15
Figura 2.5. Objetivos empleados en el sistema de videogrametría. En la izquierda se muestra el objetivo Schneider Kreuznach Xenoplan, y en la derecha el objetivo PENTAX TV LENS.	16
Figura 2.6. Cámaras con los objetivos ajustados.	16
Figura 2.7. Modelos anatómicos empleados con los marcadores reflectantes indicando los puntos de interés. En la izquierda se muestra una columna lumbar y en la derecha una pelvis con columna.	17
Figura 2.8. Cámaras con los objetivos dispuestas sobre los trípodes en distintas posiciones y orientaciones.	20
Figura 2.9. Sistema ajustado con las cámaras con sus objetivos posicionadas y orientadas sobre los trípodes, capturando información del modelo anatómico de pelvis y conectadas al ordenador. En la pantalla de este se observa la imagen proporcionada por una cámara.	21
Figura 2.10. Rejilla de calibración con cuadros blancos y negros.	22
Figura 2.11. Captura de imágenes para la obtención de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras. Amabas imágenes se encuentran sincronizadas en el tiempo, y hacen referencia a la misma situación, pero están tomadas cada una por una cámara distinta.	22

Figura 2.12. Activación de la luz negra sobre el modelo anatómico. Se observan los marcadores reflectantes iluminados.....	23
Figura 2.13. Frames capturados por ambas cámaras de forma simultánea empleando el software "Baumer Camera Explorer®" y el sistema de iluminación de luz negra.	24
Figura 2.14. Marcadores reflectantes recubiertos de pintura roja empleados en el sistema de videogrametría.	29
Figura 2.15. Bombilla Velleman de luz negra de 15W empleada en el sistema de iluminación. En la izquierda se observa la bombilla apagada, y en la derecha, ya se encuentra encendida.....	32
Figura 2.16. Tubo HQ POWER de luz negra de 20W. En la izquierda se observa apagado, y en la derecha ya está encendido.	32
Figura 2.17. Adaptador de doble rosca de 3/8 y 1/4 pulgadas de diámetro.	35
Figura 2.18. Modelo elaborado en SolidWorks® del diseño final del sistema de iluminación de luz negra.....	35

Capítulo 3

Figura 3.1. Dispositivo háptico Phantom Omni de 3D Systems empleado para la validación de las coordenadas tridimensionales.	38
Figura 3.2. Interfaz de usuario del software de obtención de coordenadas del dispositivo háptico Phantom Omni.	40
Figura 3.3. Dispositivo háptico Phantom Omni con la dirección y sentido de sus ejes X, Y, Z.	42
Figura 3.4. Modo de posicionamiento del dispositivo háptico Phantom Omni y el modelo anatómico con los marcadores reflectantes, con el fin de que los planos XY de ambos elementos coincidan y las coordenadas XYZ de los marcadores hagan referencia a los mismos ejes XYZ tanto en el dispositivo háptico como en el software desarrollado en MATLAB®.	43
Figura 3.5. Imágenes tomadas a distintas distancias con el fin de determinar la precisión de detección de los marcadores con el sistema desarrollado en el apartado 3.2. Las imágenes oscilan desde una primera distancia, entre el sistema de captura de datos y el modelo, de 75 cm hasta 150 cm, aumentando esta 15 cm en cada fotografía nueva.	44

Capítulo 4

Figura 4.1. Gráficas de los audios completos resultantes del procesamiento de dos vídeos de dos dispositivos móviles, en cuyos vídeos se han emitido dos sonidos, uno de inicio y otro de fin, los cuales han sido captados de forma simultánea por ambos. 56

Capítulo 5

Figura 5.1. Dispositivos móviles empleados en la captura de imágenes y vídeos. En la izquierda se observa el dispositivo Redmi Note 8 Pro, y en la derecha e Xiaomi Mi 8 Lite. 61

Figura 5.2. Trípodes empleados en la captura de imágenes y vídeos con dispositivos móviles. 62

Figura 5.3. Imágenes tomadas con los dispositivos móviles, con el fin de determinar la precisión de detección de los marcadores con el sistema del apartado 3.2. Esta fotografías oscilan entre unas distancias, entre el dispositivo móvil y los marcadores, de 10 y 35 cm. El resto de imágenes tomadas llegan hasta los 110 cm. 63

Figura 5.4. Curva de precisión de los dispositivos móviles empleados en la realización de esta prueba. El rango de distancias de colocación de estos se encuentra entre 40 y 80 cm entre el dispositivo y los marcadores. 63

Figura 5.5. Preparación del entorno para la obtención de las imágenes empleadas para conseguir los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada dispositivo móvil. 64

Figura 5.6. Imágenes captadas por los dos dispositivos móviles en el mismo instante de tiempo, y capturando al modelo anatómico de columna lumbar y la rejilla de calibración. Estas imágenes, junto con las 30 restantes se emplean para la obtención de los parámetros de ambos móviles. Se observa como el calibrador se encuentra en distintas localizaciones en cada imagen en función de la localización de cada dispositivo. 65

Figura 5.7. Resultados obtenidos del uso de la herramienta "Stereo Camera Calibrator". Se pueden observar dos imágenes, en la que tras la calibración, se ha realizado una reproyección en base a los parámetros extrínsecos e intrínsecos. Además, se observa un error de 5.59 píxeles, y una gráfica de los parámetros extrínsecos. 65

Figura 5.8. Preparación del entorno con los dispositivos móviles, modelo anatómico de columna lumbar y luces negras para la obtención de vídeos para su posterior análisis de

los puntos de interés. Se pueden observar los tres marcadores completamente iluminados.....	66
Figura 5.9. Movimiento de flexo-extensión de interés realizado por el modelo de columna lumbar durante la grabación de los vídeos. En la imagen de la izquierda se observa la extensión, mientras que en la de la derecha se aprecia la flexión. En la imagen central se visualiza la posición fisiológica de la columna.	66
Figura 5.10. Gráficas de los audios completos resultantes del procesamiento de los dos vídeos de los dos dispositivos móviles, en las que se observan dos sonidos, uno de inicio y otro de fin, los cuales han sido captados de forma simultánea por ambos.	67
Figura 5.11. Detección de los marcadores reflectantes por parte del sistema de videogrametría desarrollado. En la imagen izquierda se observan los marcadores visualizados por el móvil Xiaomi Mi 8 Lite, y en la derecha la imagen del móvil Redmi Note 8 Pro. Ambas imágenes se corresponden con el frame 3 de cada uno de los vídeos.	68
Figura 5.12. Trayectorias de los tres marcadores colocados en la columna lumbar basadas en las coordenadas tridimensionales obtenidas con el uso del sistema de videogrametría desarrollado.	69
Figura 5.13. Modo de colocación de los marcadores reflectantes para el estudio de la cinemática de la marcha. Un marcador se debe situar en la punta del pie, otro en el tobillo, y el último en el punto medio de la tibia. En la izquierda se observa la imagen obtenida por el dispositivo móvil Xiaomi Mi 8 Lite, mientras que en la derecha se emplea el sistema Redmi Note 8 Pro.	70

Anexo A

Figura A.1. Consola al ejecutar Coordenadas.exe.....	82
Figura A.2. Programa para la obtención de coordenadas.....	82
Figura A.3. Botón a pulsar para obtener coordenadas.	83

Anexo B

Figura B.1. Entorno ajustado para la ejecución del sistema de videogrametría.	87
Figura B.2. Modo de obtención de las imágenes para conseguir los parámetros extrínsecos e intrínsecos.....	89

1

Introducción

1.1 Motivación

La caracterización del comportamiento cinemático de especímenes en ensayos de laboratorio es necesario en estudios de diferentes ámbitos: análisis de movimiento, estabilidad de intervenciones quirúrgicas, definición de protocolos de intervención... La mayoría de los trabajos existentes utilizan sistemas de registro que pueden englobarse en uno de los dos siguientes grupos:

- Sistemas de videogrametría propios de análisis de movimientos de eslabones del modelo del sistema musculoesquelético (Vicon, Optotrack...), diseñados para campos de trabajo muy amplios y que consiguen precisiones bajas.
- Medidas de registro de sensores que deben fijarse a los eslabones, con las consiguientes limitaciones de accesibilidad y volumen (LVDT, goniómetros...).

En el campo de la metrología existen sistemas de medidas de coordenadas 3D con muy alta resolución, basado en brazos de medición de varios ejes, en cuyo cabezal se sitúan sistemas para palpación de puntos de interés o de escaneo. La tecnología es aplicable para medidas estáticas de gran precisión, pero las muy bajas velocidades de recogida de datos no permiten su utilización en ensayos dinámicos. Además, son sistemas de gran volumen y muy alto coste.

Recientemente, se están empezando a utilizar sistemas basados en el registro de imágenes de video adaptados a campos de trabajo propios de las articulaciones humanas, pero utilizando medidas 2D procedentes de una sola cámara.

Este trabajo aborda el desarrollo de un sistema de medida tridimensional de la cinemática de articulaciones humanas de huesos largos, basado en el uso de 2 cámaras de video sincronizadas, con volumen de trabajo adaptado a las dimensiones de la articulación humana y buscando alta precisión. La aplicación está destinada concretamente a la obtención experimental in-vitro de la cinemática relativa entre elementos óseos de aplicación inicialmente a ensayos ex vivo, posteriormente extensible a ensayos in-vivo, con el fin de obtener modelos personalizados

Los datos servirán como referencia geométrica en el desarrollo de modelos de elementos finitos personalizados de las estructuras anatómicas entre las cuales se ha realizado el estudio.

1.2 Objetivos

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de un sistema de medida tridimensional de la cinemática de las articulaciones humanas de huesos largos basado en videogrametría.

Para ello han de alcanzarse los siguientes objetivos intermedios:

- Desarrollo de una aplicación para el registro 3D de coordenadas, a partir de un dispositivo háptico comercial. Se trata del dispositivo Phantom Omni, el cual se utilizará como sistema de calibración para estudiar la precisión de las medidas obtenidas por el software que posteriormente se desarrollará.

- Desarrollo de un software de seguimiento de unos puntos de interés en la estructura anatómica, identificados con una serie de marcadores que se colocarán en puntos de los elementos óseos. La evolución de la posición del

centroide de los marcadores en el plano de la imagen será calculada por el software.

- Desarrollo del protocolo de extracción de medidas tridimensionales a partir del registro de puntos en 2 planos de imagen. Como resultado se obtiene una serie de coordenadas, referidas a todos los puntos, las cuales serán utilizadas posteriormente para estudiar el efecto de los movimientos realizados.
- Configuración del sistema experimental para el registro de imágenes, basado en el uso de luz negra y marcadores reflectantes a esa longitud de onda (315-400nm). Específicamente, será necesario el diseño, y posterior fabricación de un sistema de iluminación adaptado a los ensayos en articulaciones de especímenes humanos en máquina de tracción universal.
- Estimación de la precisión de la medida alcanzada por el sistema.
- Identificación de la cinemática de la articulación a partir de la evolución temporal del centroide de los marcadores.

Además, dentro de estos objetivos, se encuentra la verificación del software desarrollado usando modelos anatómicos y el trabajo con un equipo de médicos traumatólogos, con el fin de elaborar ensayos asumibles por especialistas en medicina, para conseguir llevar el software elaborado a la práctica.

1.3 Tecnologías empleadas

Con el fin de abordar y lograr los objetivos expuestos en el apartado 1.2 se van a emplear distintas herramientas, las cuales se exponen a continuación.

- **MATLAB®**: Se trata de un sistema que ofrece un entorno de desarrollo integrado, el cual posee un lenguaje de programación propio. Se puede utilizar en los sistemas operativos Windows, Unix, Linux y MacOs. Es un software muy

empleado en investigación, debido a que cuenta con grandes capacidades y permite el uso de multitud de funciones prediseñadas en las toolbox, las cuales se pueden instalar con facilidad. Permite una fácil manipulación de matrices, implementación de algoritmos, creación de interfaces de usuario, y otras muchas funcionalidades que hacen de MATLAB® un entorno con el que se puede trabajar con muchas facilidades.

- **Lenguaje de programación C++:** Este lenguaje de programación fue diseñado en 1979, con la intención de extender el lenguaje C, permitiendo la manipulación de objetos.
- **Entorno de desarrollo Visual Studio 2019:** Este entorno de trabajo es la última actualización de Visual Studio. Permite el desarrollo de software con una gran cantidad de herramientas. Además, con él se puede sincronizar los datos contenidos en la nube con el fin de trabajar con un mayor número de facilidades. Presenta elementos que permiten escribir de manera rápida y precisa, con sugerencias de código.
- **Baumer Camera Explorer®:** Se trata de un software proporcionado por la empresa Baumer, junto con las cámaras “Digital Baumer VCXU-124C” empleadas en este proyecto. Permite conectar un ordenador con al menos un sistema operativo de Windows 7/8 a las cámaras, diseñadas para la captura de imágenes y vídeos en color. Tiene múltiples opciones, entre las que se encuentra la captura de frames, captura de vídeos, modificación de la intensidad de la imagen, y otras muchas funcionalidades, las cuales son de interés en el desarrollo de este proyecto.
- **Librería OpenHaptics® de 3D Systems:** Es una librería que permite el uso de dispositivos hápticos en aplicaciones relacionadas al diseño, modelado 3D, medicina, juegos, entretenimiento, visualización y simulación.
- **SolidWorks®:** Es un software de diseño asistido por computadora para realizar modelado mecánico en 2D y 3D. Permite elaborar modelos de piezas, para

posteriormente ensamblarlas y obtener un conjunto, del que poder extraer tanto planos técnicos, como cualquier otra información necesaria para la fabricación del producto diseñado.

1.4 Metodología

La elaboración de este proyecto sigue una metodología específica, en la que el trabajo se divide en una serie de tareas.

La primera de todas se trata del estudio de los aspectos técnicos del dispositivo de medida de coordenadas 3D utilizado, es decir, el dispositivo Phantom Omni (Sensable Technologies Inc., USA), con el fin de poder obtener el valor de las coordenadas de los puntos de interés, y que servirá para estimar la precisión del sistema desarrollado en este trabajo.

Una vez realizada la familiarización con este sistema, se pasa a un proceso de desarrollo de un código que permita el uso de este dispositivo en el ámbito de la biomecánica, particularmente en la medida y obtención de coordenadas tridimensionales, por lo que se ha realizado una adaptación de su funcionamiento al interés de este proyecto.

Posteriormente, tras la obtención de coordenadas tridimensionales, se desarrollará un software de análisis de imágenes por videogrametría 3D usando MATLAB®, el cual permite realizar el seguimiento de una serie de puntos de interés en las estructuras anatómicas estudiadas, y observar la evolución de estos en el tiempo, con el fin de estudiar la cinemática relativa entre los elementos óseos involucrados. Para esta fase, es necesario diseñar un sistema de iluminación empleando luz negra que permita la correcta iluminación de la estructura anatómica.

Tras esto, se pasa a la elaboración de un sistema de validación de la precisión de detección de los marcadores situados en los puntos de interés en la estructura anatómica estudiada.

Una vez conseguido todo esto, se realizan pruebas del software de análisis de imágenes por videogrametría 3D empleando modelos anatómicos, con el fin de desarrollar protocolos de ensayos in-vitro, los cuales se llevarán a cabo tras la colaboración con un equipo de médicos traumatólogos.

Se realiza una adaptación del sistema de videogrametría, con el fin de emplear dispositivos móviles en la captura de datos, con el principal objetivo de desarrollar una aplicación a nivel de usuario, facilitando su uso y reduciendo su coste.

Finalmente, se evaluarán los datos obtenidos y se realizará la validación de estos, mediante el dispositivo háptico de medición de coordenadas tridimensionales, y el sistema de validación de la precisión de detección de los marcadores. Y, por último, se pasará a la escritura del actual trabajo de fin de grado.

1.5 Estructura del proyecto

Este proyecto se encuentra estructurado en un conjunto de capítulos, en los que se desarrollan y explican los procesos llevados a cabo para la elaboración de un protocolo de caracterización de la cinemática relativa entre elementos óseos en base a datos de videogrametría 3D. Estos capítulos se encuentran descritos en este apartado.

- **Capítulo 1. Introducción:** Se exponen los motivos para la realización de este proyecto, así como los objetivos que se desean alcanzar, las tecnologías empleadas en el proceso, y la metodología llevada a cabo para alcanzar todos estos objetivos.
- **Capítulo 2. Desarrollo del sistema de videogrametría:** Se desarrolla el concepto de videogrametría, así como los principios de calibración en este tipo de estudios, y la obtención de parámetros extrínsecos e intrínsecos. Se analiza el sistema de iluminación basado en luz negra diseñado específicamente para el proyecto. Además, se tratan aspectos como el tipo de marcador empleado para la identificación de los puntos de interés en las estructuras anatómicas

estudiadas, y finalmente, todos los aspectos relacionados con el sistema de videogrametría desarrollado en el proyecto, así como los materiales empleados, la preparación del entorno para el funcionamiento del sistema, y el software diseñado.

- **Capítulo 3. Validación del sistema:** Se realiza un análisis de los sistemas de validación desarrollados en este trabajo, con el fin de testar los resultados tridimensionales obtenidos por parte del sistema de videogrametría del Capítulo 2. Entre estos sistemas se encuentran el dispositivo háptico, y un sistema de validación de la precisión en la detección de los marcadores que indican los puntos de interés en las estructuras anatómicas a estudiar.
- **Capítulo 4. Adaptación del sistema de medida a registros con dispositivos móviles:** Se realiza una adaptación del sistema de videogrametría desarrollado en el Capítulo 2, con el fin de sustituir las cámaras empleadas como sistemas de captura de vídeos, por dispositivos móviles, con el objetivo de crear una aplicación a nivel de usuario, que facilite su uso.
- **Capítulo 5. Pruebas y resultados:** Se muestran las pruebas llevadas a cabo con el sistema de videogrametría desarrollado, de forma conjunta con la adaptación de este para el uso de dispositivos móviles y el empleo de marcadores reflectantes y luces negras.
- **Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras:** Se exponen las conclusiones alcanzadas con la elaboración del proyecto, así como la capacidad de este de seguir evolucionando y desarrollándose en posteriores trabajos.

2

Desarrollo del sistema de videogrametría

2.1 Introducción a videogrametría

Actualmente, la videogrametría se encuentra en constante desarrollo y está facilitando la realización de sistemas que antes no habían sido posibles. Originalmente, se empleaba para la obtención de medidas en 2D, pero actualmente, se están implementando sistemas para la creación de modelos 3D para muy diversas estructuras y elementos de una forma sencilla y rápida.

Para introducir el concepto de videogrametría es necesario desarrollar la fotogrametría, es decir, un sistema basado en la toma de fotografías, con el fin de modelar y obtener resultados en 3D. Este sistema de modelado en 3D consume mucho tiempo, tanto en la toma de fotografías, como en el procesado de estas. Además, se requiere de un software potente para poder analizarlas. El hecho de tener que tomar fotografías individuales de aquel elemento a modelar, es lo que conlleva este gran consumo de tiempo. Además de tener que ajustar la cámara para cada una de las tomas.

Por todo esto, surgió la videogrametría, la cual se trata de una técnica de medida en 3 dimensiones basada en los principios de la fotogrametría (Gruen, 1997), y funciona con

vídeos en lugar de fotografías. Este sistema presenta una serie de ventajas a aprovechar muy útiles. Principalmente, cabe destacar el hecho de que los vídeos proporcionan más información que una fotografía, ya que se puede trabajar con cada uno de los frames de este por separado, obteniendo una mayor cantidad de datos en el proceso de modelado 3D que los que se obtendrían con la fotografía. Otro de los aspectos es que, al trabajar con vídeos, el proceso es rápido, debido a que únicamente es necesario grabar la situación o el sistema a modelar, durante el periodo de tiempo de interés, por lo que se produce una reducción temporal respecto al tiempo que dura la captura de imágenes. Cabe destacar que la videogrametría expande todas las técnicas implantadas en la fotogrametría a diversos espacios de tiempo, creando datos dinámicos, es decir, que incluyen la evolución temporal del sistema monitorizado. Su mayor inconveniente es que habitualmente se obtienen imágenes de menor resolución. Sin embargo, los recientes avances tecnológicos han permitido un gran incremento en la velocidad de escritura de las imágenes de vídeo, apoyando actualmente el desarrollo de sistemas de videogrametría de gran precisión, tanto espacial como temporal.

Debido a esto, la videogrametría está cobrando gran importancia en el campo del análisis biomecánico, ya que permite modelar en 3 dimensiones estructuras anatómicas en las que se quiere estudiar alguna patología o sistema de corrección de esta, de una forma rápida y obteniendo una gran cantidad de información, mediante el seguimiento de elementos o marcadores específicos durante un periodo de tiempo, por lo que se va a poder estudiar la evolución de estos en determinados movimientos y situaciones, pudiendo estudiar su comportamiento y cinemática. Además de en el campo de la biomecánica, la videogrametría es de gran interés para aplicaciones en deportes, animación, y control y generación de realidad virtual (Gruen, 1997).

De forma general, los elementos esenciales que necesita este sistema son similares a los de la fotogrametría, y se basa en el seguimiento de una serie de puntos de interés a lo largo del tiempo en cada uno de los frames tomados en el vídeo. Para poder realizar este proceso, es necesario contar, como mínimo, con dos sistemas de captura de vídeos, los cuales se van a encontrar orientados hacia la zona de interés, pero en distintos

ángulos y posiciones, con el fin de obtener la máxima cantidad de datos posible del elemento a estudiar.

Para generar imágenes estéreo a partir de los registros procedentes de las diferentes cámaras que integren el sistema, estas deben sincronizarse, tanto en el eje de tiempos, como en el espacio. La primera tarea se puede lograr a través del software de adquisición del dispositivo de captura de datos o utilizando un trigger externo. La calibración de la posición espacial relativa entre las cámaras se realiza utilizando una rejilla de calibración fabricada al efecto.

Ambos sistemas de captura realizan vídeos simultáneos de los movimientos que se quieren analizar, y posteriormente se realiza el seguimiento de una serie de puntos en cada uno de los frames. Estos deben ser los mismos en ambos vídeos. Además, los sistemas obtienen datos en 2D de esos puntos, pero empleando los parámetros característicos de cada uno de ellos, es decir, los parámetros intrínsecos y extrínsecos, se puede establecer una relación entre las coordenadas de los puntos de interés en ambos sistemas. Finalmente, pudiendo pasar de tener coordenadas en 2D a coordenadas en 3D del sistema a estudiar.

2.1.1 Principios de calibración en videogrametría

La calibración del sistema de visión consiste en la obtención de los parámetros necesarios para, a partir de los planos de las imágenes obtener las coordenadas tridimensionales de los puntos que forman esas imágenes. Estos parámetros (excluyendo los radiométricos relacionados con el brillo del objeto registrado, que no son de interés en este trabajo) se dividen en dos grupos:

- **Parámetros intrínsecos de la cámara:** son los parámetros referidos al conjunto de cámara y óptica, con independencia de su ubicación en el laboratorio. Este conjunto de parámetros estará contenido en la matriz K , que relaciona las coordenadas de un punto P del espacio con las coordenadas de su proyección P' en el plano de imagen de la forma mostrada en la expresión (2.1).

$$\begin{pmatrix} P' \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Donde R es la matriz de rotación y T el vector de traslación, dependiendo ambos de la posición en la que sistema de referencia de la cámara se sitúe con respecto al objeto. La matriz de parámetros intrínsecos K dependerá de las longitudes focales en los ejes x e y de la imagen, el grado de perpendicularidad de las paredes de los píxeles del sensor, el desplazamiento del centro de la imagen, y el grado de distorsión de la lente.

- **Parámetros extrínsecos del sistema:** se trata de aquellos que hacen referencia a la colocación física de la cámara en el laboratorio, es decir, los que definen su posición relativa entre las cámaras que configuran el sistema de medida. Los parámetros extrínsecos serán, por tanto, los que definan la matriz de rotación R y el vector de traslación t de la ecuación anterior.

2.1.2 Calibración estéreo

Conocida la posición de un punto en el espacio, es posible calcular su posición en el plano de la imagen si se conocen los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, pero el proceso inverso requiere disponer de información de al menos 2 cámaras situadas en posiciones distintas respecto al objeto.

La calibración estéreo determina la posición relativa entre las distintas cámaras de un sistema de visión, a partir de su posición relativa a un mismo objeto, como puede ser una rejilla de calibración. A partir de este conocimiento, es posible realizar la triangulación que permite calcular a partir de las coordenadas de un punto en los planos de distintas cámaras su posición tridimensional.

El proceso seguido es el implementado en el algoritmo de calibración de MATLAB®, el cual parte de los parámetros intrínsecos para después obtener los extrínsecos. Para ello, se toman con ambas cámaras imágenes del patrón de calibración, situándolo en distintas posiciones dentro del campo de trabajo del ensayo. En la Figura 2.1 se

muestran los elementos que se poseen en este momento, y esenciales para la obtención de los parámetros extrínsecos del sistema completo.

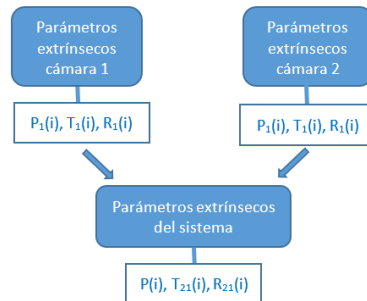


Figura 2.1. Esquema representativo del algoritmo de cálculo de los parámetros extrínsecos del sistema de dos cámaras (elaboración propia).

En primer lugar, para cada cámara j y la imagen i , se calcula la matriz de rotación $R(i)$ y el vector de traslación $T_j(i)$, que permitiría obtener las coordenadas tridimensionales de los puntos de control del patrón de calibración según lo mostrado en la expresión (2.2).

$$P_j(i) = R_j(i) \cdot q_j(i) + T_j(i) \quad (2.2)$$

Donde $q(i)$ son las coordenadas sobre el plano de la cámara j de los puntos de control en la imagen de calibración i -ésima. Expresados en el sistema de referencia de esa cámara j , según se esquematiza en la Figura 2.2.

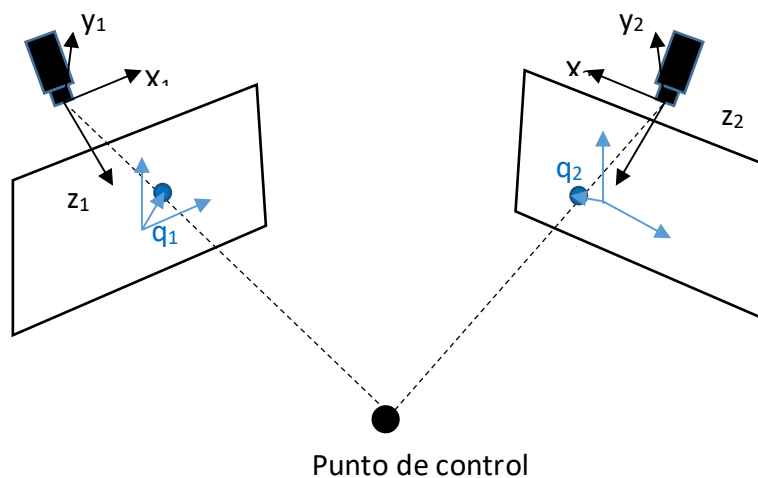


Figura 2.2. Representación del sistema compuesto por dos cámaras, con la visualización de los planos de imagen, el sistema de referencia de cada una de ellas y el punto de interés a conocer sus coordenadas tridimensionales (elaboración propia).

Tras esto, se almacenan las matrices $R_j(i)$ y los vectores $T_j(i)$ para las i imágenes de calibración en ambas cámaras.

En segundo lugar, se calcula la matriz de rotación $R_{21}(i)$, y el vector de traslación $T_{21}(i)$ del sistema de referencia de la cámara 2 respecto a la cámara 1 en cada imagen de calibración, siendo para la imagen i -ésima lo mostrado en la expresión (2.3) y (2.4).

$$R_{21} = R_1(i) \cdot R_2(i) \quad (2.3)$$

$$T_{21}(i) = T_1(i) - R_{21}(i) \cdot T_2(i) \quad (2.4)$$

Finalmente, los parámetros extrínsecos del sistema, que permiten posicionar el sistema de referencia de la cámara 2 respecto a la cámara 1, se evalúan como la mediana de las matrices $R_{21}(i)$ y vectores de traslación $T_{21}(i)$.

Una vez conocidos los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras que configuran el sistema, las coordenadas tridimensionales de cualquier punto se obtienen a través de un proceso de reconstrucción mediante triangulación.

2.2 Sistema de videogrametría

2.2.1 Materiales

Se utilizarán dos cámaras como sistema de captura de vídeos. Estas se tratan de las cámaras Digital Baumer, modelo VCXU-124C (Baumer, Frauenfeld, Suiza), con sensores CMOS con resolución de 4096 x 3000 píxeles, y registrando 29 frames por segundo. Estas cámaras permiten la captura de imágenes de forma simultánea haciendo uso del software "Baumer Camera Explorer®" (Baumer, Frauenfeld, Suiza) proporcionado por el mismo fabricante. Se pueden observar en la Figura 2.3.

Además de las cámaras, se utilizan trípodes MANFROTTO 808RC4 (Manfrotto, Cassola, Italia), esenciales para colocar en una posición determinada a los sistemas de captura de vídeos, y con la adecuada estabilidad. Estos se observan en la Figura 2.4. Como se emplean dos cámaras, se necesitan igualmente dos trípodes. Estos deben estar

perfectamente estabilizados, y regulados para conseguir que las cámaras obtengan imágenes equilibradas.



Figura 2.3. Dispositivos de captura de datos Digital Baumer VCXU-124C.



Figura 2.4. Trípodes MANFROTTO empleados para posicionar y orientar las cámaras.

Tras esto, es necesario emplear dos objetivos, los cuales se colocan en las cámaras. Sin estos objetivos no se podrían obtener imágenes utilizables. Se han empleado dos objetivos distintos. Uno se trata del modelo PENTAX TV LENS 75mm 1:2.8 (Pentax, Tokio, Japón). Mientras que el otro se corresponde con Schneider Kreuznach Xenoplan 2.8/50-0902 (Schneider Kreuznach, Bad Kreuznach, Alemania). Estos se observan en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Objetivos empleados en el sistema de videogrametría. En la izquierda se muestra el objetivo Schneider Kreuznach Xenoplan, y en la derecha el objetivo PENTAX TV LENS.

Una vez colocados los objetivos en las cámaras se ajusta la apertura y distancia focal, en función del sistema a estudiar, con el fin de obtener imágenes con buena resolución y suficiente profundidad de campo, y que permita distinguir los puntos de interés mediante los marcadores. Los dispositivos con los objetivos se muestran en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Cámaras con los objetivos ajustados.

Posteriormente, se ha empleado otro elemento esencial, el cual se trata del sistema a estudiar. En este caso, para simular una estructura anatómica se ha utilizado un modelo anatómico, el cual posee una serie de puntos de interés identificados con unos marcadores reflectantes. Este modelo anatómico se ha colocado en la zona central, rodeados por los sistemas de captura de imágenes con los trípodes y objetivos. Estos modelos anatómicos están compuestos de una capa rígida superficial con material

esponjo interno, para reproducir el hueso trabecular y cortical. Concretamente se ha utilizado la columna lumbar extraída del modelo de pelvis completa masculina de Sawbones (Sawbones®, Pacific Research Laboratories Inc., USA), que reproduce en espuma de poliuretano rígida las vértebras L1 a L5. Ambos modelos se observan en la Figura 2.7.

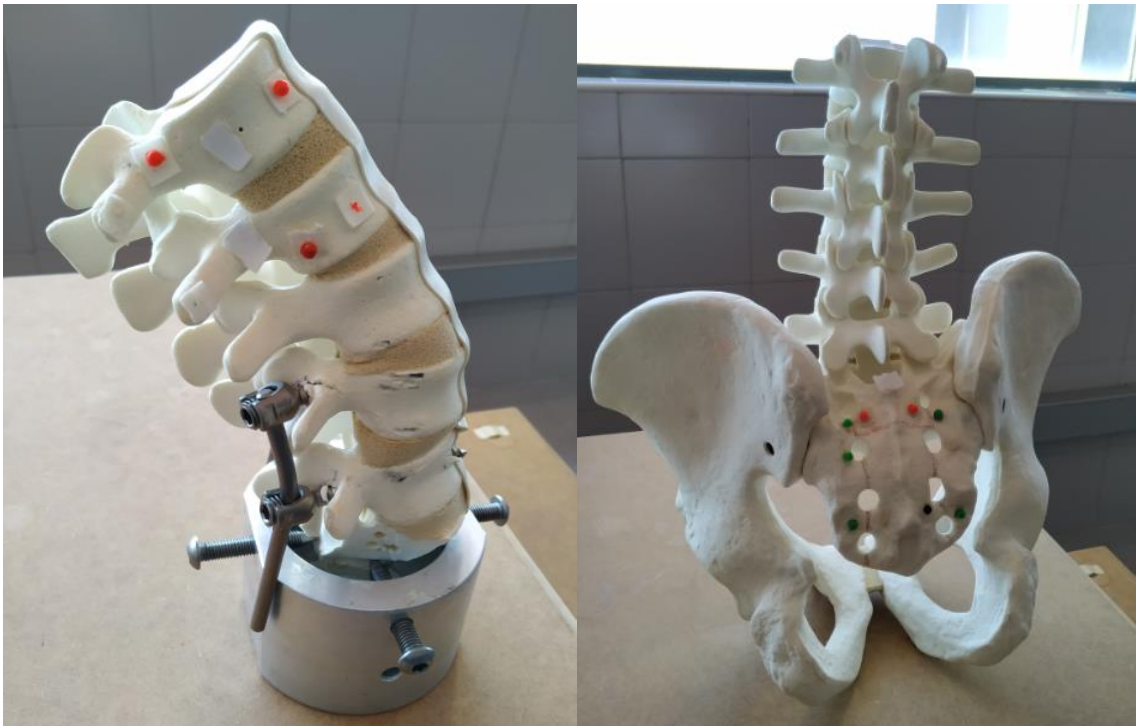


Figura 2.7. Modelos anatómicos empleados con los marcadores reflectantes indicando los puntos de interés. En la izquierda se muestra una columna lumbar y en la derecha una pelvis con columna.

Una vez se cuenta con todos los elementos mencionados hasta el momento, se necesita poseer un sistema de iluminación basado en luz negra, diseñado y desarrollado en el apartado 2.4 y unos marcadores reflectantes, analizados en el apartado 2.3. El sistema de iluminación se trata de un arco de luces con una serie de bombillas de luz negra. Además, los marcadores reflectantes se encuentran recubiertos con una pintura que se ilumina con la longitud de onda de esta luz del sistema de iluminación, la cual oscila entre 315 y 400 nm. Los marcadores deben colocarse en aquellos puntos de interés, de los cuales posteriormente se quieren estudiar sus coordenadas tridimensionales, con el fin de obtener la cinemática relativa entre las estructuras óseas del modelo anatómico.

Además de todos los elementos anteriores, para poder llevar a cabo todo el procedimiento es necesario contar con un ordenador que permita la utilización del software “Baumer Camera Explorer®” (Baumer, Frauenfeld, Suiza). Es decir, como mínimo debe tener un sistema operativo de Windows 7.

2.2.2 Preparación del sistema

Una vez determinados todos los elementos esenciales para el correcto funcionamiento del sistema, se va a proceder a realizar una explicación detallada de todo el procedimiento, y como se logra obtener las coordenadas tridimensionales de los puntos de interés, las cuales posteriormente servirán para poder estudiar la cinemática relativa entre las estructuras óseas.

Para poder comenzar a tomar vídeos es necesario poseer una estructura anatómica a estudiar, en este caso se han empleado modelos anatómicos de columna lumbar y pelvis completa masculina, los cuales han sido desarrollados en el apartado 2.2.1, y se pueden observar en la Figura 2.7. Estos modelos anatómicos deben colocarse en una posición, similar a la fisiológica, y la cual permita la realización del movimiento que se quiere estudiar. Una vez posicionado el modelo, se debe realizar una identificación de aquellos puntos de interés, los cuales son esenciales para poder estudiar la cinemática.

Los puntos de interés deben seleccionarse cuidadosamente, en función de las estructuras con las que se trabaje. Además, es muy importante colocar tantos marcadores como sean necesarios para conseguir tener la estructura bien definida en el espacio, lo que supone al menos 3 marcadores visibles en todos los frames en cada sólido rígido, cuya cinemática quiera estudiarse. Se debe por tanto determinar la ubicación relativa de los marcadores respecto a las cámaras para evitar en la medida de lo posible que se oculten durante el ensayo. Una vez se han identificado, se realiza un marcaje de estos empleando los marcadores reflectantes. Estos deben colocarse de una forma pulcra, y cuando se coloque el recubrimiento de pintura, es necesario que esta únicamente afecte al marcador, y no a ninguna otra zona de la estructura anatómica. Además, los marcadores deben estar cubiertos por una capa homogénea de pintura, con el fin de que todas las superficies de este estén completamente pintadas. La pintura

empleada debe ser reflectante a la longitud de onda de la luz negra, es decir, de 315 a 400 nm.

Una vez se tiene la estructura anatómica con todos los puntos de interés identificados con los marcadores reflectantes, se emplea el sistema de iluminación de luz negra diseñado en este proyecto, particularmente desarrollado en el apartado 2.4. Este debe colocarse de modo que afecte a todos los marcadores y los ilumine perfectamente. Se debe comprobar que el sistema de iluminación está bien posicionado, tanto en la situación en la que la estructura que se quiere estudiar se encuentre en una posición estática, como en el momento en el que dicha estructura comienza a realizar el movimiento que se desea analizar.

La iluminación es un aspecto esencial, por no decir el más importante para el funcionamiento del sistema. Una mala iluminación puede hacer que no se detecte ningún marcador, y que el ensayo llevado a cabo no tenga interés científico, debido a la falta de rigor y buenos resultados.

Esta iluminación debe permitir que en cualquier posición en la que se encuentre la estructura anatómica dentro del movimiento a estudiar, los marcadores se encuentren perfectamente iluminados. No es suficiente con que se encuentre una zona del marcador, es necesario que este pueda identificarse completamente, con el fin de poder detectar el centroide de este en el procesado posterior con el software desarrollado.

Un aspecto a tener en cuenta en este momento es evitar zonas claras cercanas a la estructura a estudiar, o que puedan verse iluminadas por la luz negra generando reflejos no deseados. Si esto ocurre, puede pasar que el software diseñado detecte esas zonas como un punto de interés, ya que la intensidad reconocida es similar a la de la pintura reflectante del marcador.

Una vez conseguida una buena iluminación, e identificación de los puntos de interés en el modelo anatómico, donde se encuentran las estructuras óseas de las que se quiere estudiar la cinemática, se deben colocar los sistemas de captura de vídeos. Conociendo

la posición en la que se encuentra el modelo anatómico, las dos cámaras deben colocarse alrededor de este. Se debe evitar que ambas se encuentren en la misma posición, o cercana, ya que en estos casos no se obtendría la información deseada. Las cámaras deben colocarse de modo que permitan abarcar la mayor cantidad de información. Estas deben situarse en posiciones y orientaciones distintas. Además, se debe comprobar que, realizando cualquier movimiento en el modelo anatómico, los puntos de interés sigan siendo percibidos por parte de las cámaras, y no se oculten, bien porque se salen de la zona de captura, o bien porque otra estructura del modelo los tapa. Una vez seleccionada la posición de estas, se ajusta la posición de los trípodes y se comprueba que estén perfectamente equilibrados y estabilizados. Esta colocación se observa en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Cámaras con los objetivos dispuestas sobre los trípodes en distintas posiciones y orientaciones.

Previamente a la captura de los vídeos, a las cámaras se les ha colocado los objetivos. En estos es necesario determinar la apertura, la cual en este sistema es de $f/11$. Además, en cada objetivo debe modificarse la distancia de captura de datos, en función de la longitud existente entre la estructura anatómica y el sistema de captura de datos. Este valor depende de la posición en la que se coloquen ambos elementos.

Una vez alcanzado este momento, se puede empezar a realizar la captura de vídeos. Para ellos es necesario conectar los sistemas de captura de vídeos al ordenador y

empezar a utilizar el software “Baumer Camera Explorer®” proporcionado por las cámaras. Esta situación se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Sistema ajustado con las cámaras con sus objetivos posicionadas y orientadas sobre los trípodes, capturando información del modelo anatómico de pelvis y conectadas al ordenador. En la pantalla de este se observa la imagen proporcionada por una cámara.

Antes de comenzar a realizar la grabación de vídeos, es necesario obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara. Para ellos, se ha empleado una herramienta proporcionada por MATLAB® (Matlab ©, MathWorks, USA). Esta se trata de “Stereo Camera Calibrator”, la cual se encarga, en base a una serie de imágenes capturadas por ambas cámaras, de obtener estos parámetros.

En el ensayo realizado para la obtención de estos parámetros de ambas cámaras no es necesario emplear la luz negra, por lo que el sistema de iluminación se desconecta. Este procedimiento se realiza con luz natural. Sin embargo, la herramienta requiere de un patrón bidimensional de calibración, que debe generarse sobre una superficie mate para que no presente reflexiones que produzcan brillos en la imagen. Este se ha diseñado como una plantilla formada por 9 cuadrados de 4mm de lado impresa en papel y colocada posteriormente sobre una placa de latón para su manipulación y para asegurar

la bidimensionalidad. Los puntos de control para la calibración serán las esquinas de los cuadrados. Este elemento puede ser claramente identificado por la herramienta de MATLAB®, indicando previamente el tamaño de los cuadrados del tablero a reconocer. Por defecto este valor viene determinado a 25mm, el cual se ha modificado a 4mm. Este tablero se observa en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Rejilla de calibración con cuadros blancos y negros.

En la obtención de las fotografías, el tablero de la Figura 2.10 se coloca en distintas posiciones y orientaciones alrededor del modelo anatómico. En cada posición y orientación en la que se coloque se realiza la captura de una imagen en ambas cámaras de manera simultánea. Este procedimiento se realiza hasta obtener una cantidad aproximada entre 20 y 30 fotografías. Siempre modificando la localización del tablero, y evitando obtener imágenes borrosas o que no aporten demasiada información. Además, es interesante que en los pares de imágenes generados se observe completamente el tablero con ambas cámaras. Dos imágenes tomadas cada una por una cámara con el tablero de calibración se observan en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Captura de imágenes para la obtención de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras. Ambas imágenes se encuentran sincronizadas en el tiempo, y hacen referencia a la misma situación, pero están tomadas cada una por una cámara distinta.

Una vez completado el proceso de obtención de estas imágenes, se emplea la herramienta "Stereo Camera Calibrator" de MATLAB®, en la cual, proporcionando dos directorios donde se encuentran las fotografías de ambas cámaras, y seleccionando el tamaño del tablero en milímetros, se realiza una correspondencia de todas las fotografías tomadas entre ambas cámaras. De modo, que finalmente, se pueden obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada cámara y el error que se ha producido en este proceso. Es importante que este error no tenga un valor muy elevado. Este se obtiene en píxeles, por lo que, en función de los píxeles de la imagen, hay que intentar controlarlo. Además, esta herramienta devuelve una gráfica representativa de estos parámetros.

Tras la obtención de los parámetros, los cuales son esenciales para el correcto funcionamiento del sistema, se activa el sistema de iluminación y se oscurece la sala en la que se esté trabajando, de modo que en este momento se empieza a trabajar con luz negra para conseguir una correcta iluminación de los marcadores reflectantes. En este punto no se utiliza el tablero de cuadros blancos y negros, ya que este solo es necesario en el proceso de obtención de los parámetros extrínsecos e intrínsecos de ambas cámaras. Esta situación se observa en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Activación de la luz negra sobre el modelo anatómico. Se observan los marcadores reflectantes iluminados.

Una vez conseguido esto, se empieza a utilizar el software "Baumer Camera Explorer®" proporcionado por los sistemas de captura de vídeos. De modo que, con el modelo anatómico colocado en su posición, junto con el sistema de iluminación de luz negra, se comienza el proceso de obtención de datos, en el cual ambas cámaras obtienen información de manera simultánea. En este procedimiento, se realiza el movimiento que se desea estudiar en la estructura anatómica, y del cual se desea obtener la cinemática relativa entre las estructuras óseas. En los vídeos se refleja la evolución en la posición de los puntos de interés identificados con marcadores reflectantes en función del movimiento producido. Es importante que ambas cámaras capturen información de manera simultánea, y poseyendo ambos vídeos el mismo número de frames, con el fin de poder ser procesados posteriormente por el software desarrollado, y poder realizar la correspondencia de los puntos de interés entre ambos dispositivos. En este proceso de captura de vídeos es muy importante controlar la aceleración en el movimiento que se está realizando, debido a que es necesario que este se realice con una velocidad constante, con el fin de evitar que las cámaras no capturen de forma adecuada la información, y los marcadores no se detecten posteriormente. En la Figura 2.13 se observan instantes simultáneos capturados por ambas cámaras usando el software "Baumer Camera Explorer®".

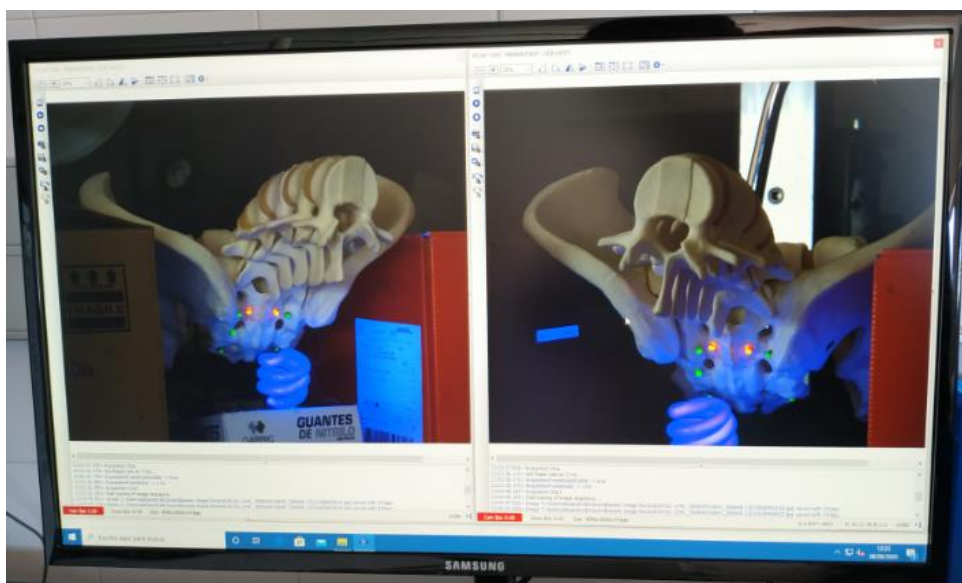


Figura 2.13. Frames capturados por ambas cámaras de forma simultánea empleando el software "Baumer Camera Explorer®" y el sistema de iluminación de luz negra.

Una vez obtenidos los vídeos de ambas de cámaras de la estructura anatómica, realizando el movimiento que se desea estudiar, y los parámetros extrínsecos e intrínsecos de ambos sistemas, se puede pasar a aplicar el software desarrollado en este proyecto. El protocolo de uso de este sistema se observa en el Anexo B.

2.2.3 Funcionamiento del software

En este trabajo se ha desarrollado un software, el cual consta de dos partes diferenciadas, las cuales van a exponerse en este apartado.

La primera de ellas emplea los dos vídeos simultáneos, obtenidos previamente por los dos dispositivos de captura de datos sincronizados, del modelo anatómico a estudiar realizando el movimiento de interés. Una vez se le proporcionan al sistema, se debe elegir el número de marcadores con los que se quiere trabajar y el color del marcador del cual se quiere seguir su trayectoria, ya que se encuentra identificando los puntos de interés. En función de este, el código establece unos rangos de valores HSV, es decir, se ajustan valores máximos y mínimos para el matiz, la saturación y el valor del color buscado en el marcador. Estos valores dependen en gran medida de la pintura empleada sobre el marcador reflectante. Estos rangos se estableces en función del color emitido por el marcador una vez se emplea el sistema de iluminación con luz negra. En este sistema se ha empleado el color rojo, aunque se puede seleccionar verde o azul.

Tras esto, se realiza una medición de diámetro del marcador en el primer frame, medida la cual va a ser muy útil para que el código pueda conocer el tamaño de marcador que debe buscar.

Una vez realizado esto, se empieza a trabajar con cada frame por separado, de modo que se van a buscar los marcadores reflectantes en los puntos de interés en cada frame del vídeo, con el fin de poder establecer la trayectoria seguida durante el movimiento de interés, para poder estudiar con claridad la cinemática relativa entre los elementos óseos en función de la localización tridimensional de estos marcadores.

Cuando se empieza a trabajar con un frame, este, al emplear dos cámaras que permiten la obtención de imágenes en color, se encuentra en formato RGB, por lo que se realiza una conversión al formato HSV, del cual previamente se han definido los rangos para sus tres parámetros en función del color del marcador. Una vez realizado esto, se extraen de ese frame las imágenes del formato HSV de forma individual, es decir, por un lado, se trabaja con la imagen de matiz, por otro con la de saturación, y finalmente con la de valor. De este modo, se van a poder aplicar los rangos previamente definidos.

Posteriormente, se aplican los rangos de matiz, saturación y valor a estas tres imágenes individuales, de modo que las intensidades de los píxeles en esas imágenes van a tener que estar contenidos entre el valor máximo y el valor mínimo del rango. A cada imagen se le aplica su rango correspondiente. Y una vez logrado esto, se combinan las tres imágenes con el fin de obtener únicamente los píxeles del frame que se encuentren entre los tres rangos definidos.

Tras esto, se posee una imagen cuyos píxeles poseen unos valores que ya se encuentran en estos rangos en función del color emitido por el marcador. Por lo que aquellas regiones cuyos valores se encuentren alejados o sean distintos a los rangos no se tienen en cuenta. En este momento, se realiza una operación de cierre estableciendo un elemento estructurante, con el fin de suavizar bordes. Además, se rellenan todos los huecos generados en las regiones de interés.

Una vez aquí, se posee una imagen que hace referencia a las regiones a estudiar y cuyos valores encuentran en el rango del color deseado, sin embargo, para evitar que se reconozcan zonas cuyo valor es similar al del color de los marcadores, se vuelve a realizar un sesgo, considerando únicamente aquellas regiones cuya intensidad es mayor de 200, de un máximo de 255, debido a que la imagen se encuentra en formato uint8. De este modo, dentro del color del marcador, únicamente se consideran aquellos píxeles, en los que la intensidad de estos es superior a 200, es decir, solo puede tratarse de aquellas zonas iluminadas por la luz negra. Tras la realización de esto, se tiene una imagen en la que únicamente deben encontrarse las regiones de los marcadores reflectantes. Debido a este último paso, el sistema de iluminación es muy importante, ya que el marcador

debe encontrarse iluminado de una forma muy directa, con el fin de que el valor de su intensidad sea cercano al límite de 255. Si la iluminación es pobre, puede ocurrir que, aunque este marcador resalte con respecto al resto de estructuras, el valor de su intensidad sea bajo, y por lo tanto se desprecie de la imagen final. Además, si este límite de intensidad se reduce, además del marcador, en la imagen aparecerían otras regiones de valores similares, que también se encuentran en el rango HSV determinado.

Posteriormente, ya se empieza a realizar la búsqueda de regiones circulares, haciendo uso del diámetro medido inicialmente. Este proceso solo se realiza al primer frame, y se encarga de buscar regiones con forma circular que resalten con respecto al fondo. Una vez conseguido, se obtienen los valores del centroide y el radio de todos los marcadores de este primer frame.

Tras esto, para el resto de frames, en función de las posiciones y el tamaño de los marcadores en el primer frame, se realiza una búsqueda únicamente en aquellas zonas cercanas a la posiciones de estos en el frame anterior. De modo que para poder obtener la localización de los marcadores en todos los frames, es necesario obtener todos los marcadores en el primer frame, y a partir de este, se comienza a buscar únicamente en regiones cercanas en el resto de frames. Es decir, para encontrar los marcadores en el segundo frame es necesario emplear la localización del primero, pero en el caso del tercer frame, emplea las localizaciones del segundo. Por lo que, cada frame utiliza las localizaciones de los marcadores del frame anterior con el fin de encontrar las posiciones en el frame actual. Esto permite reducir el tiempo de ejecución del algoritmo, debido a que no tiene que buscar en la imagen completa, únicamente en pequeñas secciones de esta del tamaño definido en el código en función de las dimensiones de la imagen. Esta reducción de tiempo es muy importante, debido a que cuanto mayor sea la resolución de esta, el tiempo de ejecución del algoritmo es mayor, pudiendo generar retrasos no deseados. El código de seguimiento de los marcadores se observa en el Anexo C.

Una vez se obtienen las localizaciones en los frames, se realiza una visualización de estos, en función del centroide y del radio. Además, los valores de todos los marcadores

se almacenan en una lista, la cual es esencial para conseguir obtener las coordenadas tridimensionales de todos ellos y poder estudiar la cinemática.

Una vez se ha realizado este proceso para todos los frames de los dos vídeos, y se han encontrado las posiciones en 2D de todos los marcadores en cada uno de ellos, se puede conocer la trayectoria que han seguido estos, en función del movimiento realizado. Sin embargo, si se analizan los marcadores de cada vídeo por separado, solo se obtiene parte de la información, y hay mucha que se pierde. Por lo que, para evitar esto, se realiza la segunda parte del software.

Esta segunda parte, se inicia con dos listas, en las cuales se cuenta con las posiciones en 2 dimensiones de todos los marcadores reflectantes en todos los frames de ambos vídeos. Además de contar con estas, es necesario utilizar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de ambas cámaras calculados previamente. Con todos estos elementos se realiza un proceso de triangulación y corrección de la distorsión de la lente de cada cámara sobre los puntos obtenidos.

En este proceso, se trabaja con los marcadores de cada frame por separado, es decir, de la lista de posiciones de los puntos de interés de cada cámara, se seleccionan en ambas listas las posiciones que hacen referencia al mismo frame. Una vez se poseen, se realiza la corrección de la distorsión de la lente en cada cámara sobre las posiciones de los marcadores obtenidos con dicha cámara. Es decir, se corrige la distorsión de la primera cámara sobre los marcadores obtenidos por ella, y posteriormente, se corrige la distorsión de la segunda cámara sobre los marcadores detectados por esta. Para realizar esta corrección, es necesario emplear las posiciones de los marcadores en el frame con el que se está trabajando en ese momento, y los parámetros obtenidos de cada cámara. Una vez finalizada la corrección de la distorsión, se realiza la triangulación, empleando las posiciones de los marcadores obtenidas por ambas cámaras con la distorsión corregida, y los parámetros extrínsecos e intrínsecos de ambas cámaras. Esta triangulación permite obtener las coordenadas tridimensionales de todas las posiciones de los marcadores en todos los frames de los vídeos de ambas cámaras.

Finalmente, con estas posiciones tridimensionales de los marcadores en todos los frames, se puede realizar un estudio de la trayectoria seguida durante un movimiento específico en la estructura anatómica que se está estudiando, y se puede analizar la cinemática relativa entre los elementos óseos en los que se encuentran los marcadores. Además, al trabajar con coordenadas tridimensionales, la cantidad de información con la que se cuenta es mayor, y los cálculos que se realizan para el estudio de dicha cinemática poseen una veracidad superior.

2.3 Marcadores reflectantes

Para poder utilizar y trabajar con el sistema de videogrametría desarrollado en este proyecto es necesario tratar determinados aspectos que son esenciales para obtener resultados correctos. El primero de estos es el uso de marcadores reflectantes. Estos se pueden observar en la Figura 2.14.



Figura 2.14. Marcadores reflectantes recubiertos de pintura roja empleados en el sistema de videogrametría.

Estos marcadores reflectantes son un aspecto que es muy importante desarrollar, debido a que estos elementos son los que determinan los puntos de interés, de los cuales se quieren obtener las coordenadas en 3D en todos los frames de los vídeos realizados.

Los marcadores empleados son reflectantes. Este es un aspecto muy novedoso, que hasta el momento no se había utilizado, o en muy pocos sistemas. Estos marcadores se localizan en los puntos de interés, respecto a los cuales se desea estudiar la cinemática de la estructura anatómica.

Los puntos donde se encuentran los marcadores son los que se detectan por parte del sistema de videogrametría en cada uno de los frames del video que se obtiene por cada sistema de captura de videos, y posteriormente, son los que se emplean para la obtención de las coordenadas tridimensionales.

Estos marcadores, al ser reflectantes, como ya se ha mencionado, cuando se vean iluminados por la luz negra desarrollada en el apartado 2.4, van a resaltar con respecto al resto de colores y zonas de la estructura anatómica, y gracias a esto, es mucho más sencillo por parte del sistema de videogrametría detectarlo.

Además, el sistema de iluminación del apartado 2.4 emite muy poca luz visible, por lo que únicamente se van a ver iluminados los marcadores reflectantes cuya pintura se ilumine con la longitud de onda de la luz negra empleada (315 - 400nm), y el resto de las zonas y superficies de la estructura no se reflejan, por lo que es más complicado que sean detectados por el sistema de videogrametría.

Gracias a esto, mediante el uso combinado del sistema de iluminación con luz negra, y los marcadores recubiertos con pintura reflectante a la misma longitud de onda del sistema de iluminación, se pueden detectar con gran facilidad los puntos de interés para estudiar la cinemática relativa entre estructuras óseas.

2.4 Sistema de Iluminación

Como se menciona en el apartado 2.3, existen una serie de aspectos esenciales para el funcionamiento del sistema de videogrametría. Una vez desarrollado el primero de ellos, es decir, el uso de marcadores reflectantes en el apartado 2.3, es necesario analizar el segundo de ellos, el cual se trata del sistema de iluminación empleado para la detección de los marcadores.

Cuando se emplea el sistema de videogrametría desarrollado, se utilizan dos cámaras, las cuales poseen sus correspondientes objetivos y se encuentran enfocadas hacia la estructura anatómica que se desea estudiar. Una vez que ambas se encuentran

correctamente calibradas, se procede a la realización de los vídeos que se analizarán en el software. Sin embargo, para poder analizar de una forma adecuada dichos vídeos, es necesario que la estructura anatómica cuente con una iluminación determinada.

Si no se emplea ningún tipo de sistema de iluminación concreto, actúa la luz natural, y ambas cámaras realizan los vídeos simultáneos, pero cuando el software los procesa, le es muy complicado detectar los puntos de interés marcados, por lo que, no los identificará correctamente, o seleccionará otros, y el estudio posterior aportará resultados incorrectos en cuanto a las coordenadas tridimensionales de dichos puntos. Al no estar bien iluminado, puede ocurrir que el sistema detecte otros puntos, como ya se ha mencionado, o bien que encuentre unos puntos con una cámara y otros con la otra, de modo que, a la hora de realizar fusión de la información proporcionada por ambos sistemas de captura de imagen, los resultados no serán correctos, y por lo tanto, no tendrán interés para el estudio de la cinemática de las estructuras óseas.

En este proyecto se ha trabajado con distintos sistemas de iluminación, pero todos tienen en común el hecho de que emplean un tipo concreto de luz, la luz negra, la cual es esencial debido al tipo de marcadores empleados, los cuales se han desarrollado en el apartado 2.3 de este mismo capítulo.

Actualmente, muy pocos sistemas de videogrametría emplean la luz negra como sistema de iluminación, por lo que se trata de un aspecto muy novedoso, el cual está comenzando a implementarse, y está proporcionando muy buenos resultados. Esta luz, también denominada luz ultravioleta de onda larga (UV-A), no emite demasiada luz visible. Además, este tipo de luces son muy ineficientes, ya que emiten muy pocos lúmenes por vatio de potencia para un uso convencional, lo que hace que su temperatura aumente rápidamente. Sin embargo, para los sistemas de videogrametría proporcionan muy buenos resultados. Esta luz se emplea en ambientes oscuros o con poca luz visible, con el fin de resaltar algunos colores sobre otros. Esta es una característica esencial, debido a que gracias a esto se pueden resaltar los marcadores empleados con respecto al resto de la estructura anatómica, lo cual permite al sistema de videogrametría detectarlos, para posteriormente analizarlos. Posee una longitud de onda que oscila entre los 315 y

400nm. Además, cabe destacar que esta luz presenta una función germicida y bactericida.

Es muy importante que la estructura anatómica a estudiar posea una iluminación uniforme, homogénea y desde todas las direcciones, con el fin de evitar la generación de sombras en áreas parciales de los marcadores, que distorsionen la forma reconocida por el algoritmo y, por tanto, las coordenadas tridimensionales de su centroide.

El primer sistema de iluminación empleado se trata de un conjunto formado por una bombilla y un tubo de luz negra. La primera bombilla es de la marca Velleman (Velleman, Bélgica) y de 15W. El segundo elemento, es decir, el tubo es de la marca HQ POWER, y es de 20W. Este sistema no abarca toda la estructura anatómica, por lo que cuando esta se mantiene en su posición inicial todo funciona correctamente, sin embargo, cuando empieza a realizar el movimiento a estudiar, o para el cual ha sido diseñada, los marcadores dejan de estar iluminados y el sistema de videogrametría no puede detectarlos correctamente, incluso dándose el caso de que se pierdan, y deje de encontrarlos. En las Figuras 2.15 y 2.16 se pueden observar los componentes de este primer sistema de iluminación.



Figura 2.15. Bombilla Velleman de luz negra de 15W empleada en el sistema de iluminación. En la izquierda se observa la bombilla apagada, y en la derecha, ya se encuentra encendida.



Figura 2.16. Tubo HQ POWER de luz negra de 20W. En la izquierda se observa apagado, y en la derecha ya está encendido.

Tras esto, se ha detectado la necesidad de que el sistema de iluminación afecte a los marcadores durante todo el proceso de captura de vídeos, por lo que se ha diseñado un sistema compuesto por un arco de luces.

Por todo esto, el sistema de iluminación es esencial para poder trabajar con este sistema de videogrametría de una forma adecuada y obteniendo buenos resultados. Este debe abarcar completamente todos los marcadores empleados durante todo el proceso de captura de vídeos. Además, como características esenciales debe destacar que sea luz negra, homogénea y uniforme.

2.4.1 Diseño del sistema de iluminación

Se ha realizado el diseño de un sistema de iluminación que cumpla todas las funciones necesarias para obtener buenos resultados, es decir, que afecte a todos los marcadores reflectantes durante todo el proceso de captura de datos, evitando que estos dejen de estar iluminados, y, por tanto, se produzca una pérdida de coordenadas, y de información esencial para obtener resultados adecuados. Este diseño se ha llevado a cabo en el software SolidWorks®.

Además, el sistema diseñado permite una fácil orientación y posicionamiento, debido a que este se une por su parte inferior a un trípode, permitiendo este, gracias a una rótula, una orientación sencilla.

Los principales componentes de este sistema son:

- Arco de luces
- Soporte
- Tornillos y tuercas
- Bombillas de luz negra y portalámparas.
- Cables.
- Interruptor.

Por tanto, este dispositivo cuenta con un arco de luces, el cual presenta seis taladros, con el fin de permitir la colocación de seis bombillas de luz negra. Además, posee en su zona delantera una cavidad para introducir un interruptor, el cual permite el encendido y apagado de todas las luces a la vez.

Por otro lado, este arco posee en su zona inferior un taladro para poder introducir los cables que unen todas las bombillas con el interruptor y, además, cuenta con una clavija para conectarse a la corriente, y, por tanto, permitir el paso de esta y encendido de las luces.

Este arco es hueco, debido a que debe dejar espacio interior para la colocación de las bombillas y el paso de los cables. Por esto, se cuenta con una tapa para la zona posterior, la cual presenta cuatro taladros, que permiten introducir cuatro tornillos M10 de 50 mm de longitud para unir ambas partes del arco. La zona delantera del arco cuenta con entrantes para dichos tornillos.

Otro de los elementos diseñados en este sistema de iluminación es un soporte, el cual se encuentra entre el trípode y el arco de luces. Debido a esto, el arco presenta en sus zonas laterales dos taladros, uno en cada lateral, para poder introducir dos tornillos M10 de 70 mm de longitud, los cuales entran por otros dos taladros presentes en el soporte. Además, se poseen dos tuercas mariposas de diámetro 10 mm, las cuales rodean los tornillos, y permiten unir con una gran sujeción el arco y el soporte.

Además, cabe destacar que este soporte permite variar la orientación del arco de luces, manteniendo siempre la misma posición, de modo que este consiga una movilidad mayor, lo cual es muy útil en el caso de que se haya alcanzado la posición deseada, pero los marcadores se encuentren en una orientación distinta al arco, y se desee colocar a ambos elementos en planos paralelos para que todos los marcadores se vean igualmente afectados por la luz negra.

En la zona inferior de este soporte se observa otro taladro, el cual permite la entrada del adaptador que une el soporte al trípode. Este taladro tiene el mismo diámetro que

la rosca del adaptador, el cual posee dos diámetros disponibles, los cuales se tratan de 3/8 y 1/4 pulgadas, que se corresponden con los presentes en el trípode. En la Figura 2.17 se puede observar un modelo de adaptador empleado para este propósito.



Figura 2.17. Adaptador de doble rosca de 3/8 y 1/4 pulgadas de diámetro.

De este modo, se posee un diseño final de un sistema de iluminación, compuesto por tres piezas principales, las cuales son un arco delantero, un arco trasero y un soporte. Además de poseer todos los elementos de unión entre ellos, contando con tornillos y tuercas. Otro elemento indispensable es el trípode sobre el que se coloca este sistema, el cual permite una fácil orientación y posicionamiento, contando, además, con la ayuda del soporte. Este diseño final se puede observar en la Figura 2.18. Además, el presupuesto de este diseño se observa en el Anexo F, junto con el plano de explosión en el Anexo G.

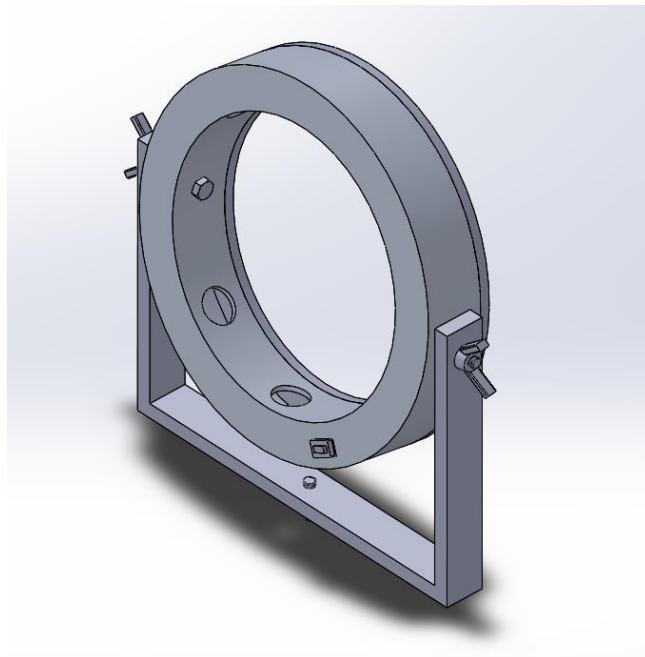


Figura 2.18. Modelo elaborado en SolidWorks® del diseño final del sistema de iluminación de luz negra.

3

Validación del sistema

La aplicación del software desarrollado en este proyecto, y explicado en el apartado 2.2.3 permite la obtención de las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectantes, los cuales se sitúan en los puntos de interés para poder estudiar la cinemática relativa de la estructura anatómica en un determinado movimiento. Sin embargo, es necesario establecer un sistema de validación, con el que se pueda testar que estas coordenadas tridimensionales son correctas, y no se está produciendo un error de cálculo en el algoritmo. Para ello, en este proyecto se han elaborado dos sistemas de verificación.

3.1 Dispositivo háptico

El primer sistema con el que se trabaja es un dispositivo háptico. En particular se trata del dispositivo Phantom Omni de la empresa 3D Systems (3D Systems, Carolina del Sur, Estados Unidos) el cual se puede observar en la Figura 3.1.

Los dispositivos hápticos son elementos que permiten al usuario sentir, manipular, diseñar y crear objetos tridimensionales simulados dentro de un ambiente virtual, en función de lo que este dispositivo este tocando con su puntero. En concreto, el

empleado en este proyecto es un dispositivo profesional, el cual se utiliza principalmente en los campos de la investigación, diseño y modelado en 3D. Además, se trata de un dispositivo con motor que aplicando retroalimentación de fuerza a la mano de la persona que lo está utilizando, le permite detectar objetos y percibir sensaciones táctiles, conforme el usuario manipula dichos objetos en una pantalla. Presenta una resolución de 0,055mm.



Figura 3.1. Dispositivo háptico Phantom Omni de 3D Systems empleado para la validación de las coordenadas tridimensionales.

Sin embargo, este dispositivo no está diseñado para la obtención de coordenadas tridimensionales, que es lo que se quiere validar en este proyecto. Por lo que, durante este trabajo, se ha realizado una adaptación de su funcionamiento, con el fin de poder obtener estas coordenadas 3D de cualquier punto que se desee, lo cual permite validar las coordenadas de los marcadores reflectantes.

Para poder trabajar con este dispositivo es necesario contar con un ordenador que posea entrada firewire, con el fin de poder realizar la conexión entre el dispositivo háptico y el computador.

En este proceso de adaptación, no se ha encontrado ningún software proporcionado por la empresa que realice la función deseada, por lo que se ha trabajado con la librería OpenHaptics®, la cual la empresa 3D Systems pone a disponibilidad de los usuarios. Para poder utilizarla, se ha empleado el entorno de desarrollo Visual Studio 2019.

Una vez se poseían estos elementos, se ha instalado la librería en el entorno de desarrollo, y se ha elaborado un código, el cual permite la obtención de coordenadas tridimensionales de cualquier punto que se seleccione, empleando el lápiz que posee el dispositivo háptico.

El código elaborado consiste en la obtención de las coordenadas tridimensionales del punto que está tocando la punta del lápiz del dispositivo háptico, cuando se presiona el botón que este posee. De modo, que en el momento que se produce esta presión, el dispositivo devuelve por consola las coordenadas XYZ de esa posición medidas respecto a la base de este, es decir, la deseada. Una vez obtenidas esas coordenadas, el código crea un archivo de texto en el que las almacenas, y conforme se seleccionan otros puntos, estos se añaden a ese documento. La elaboración de este archivo tiene como objetivo facilitar el guardado de las coordenadas, y la manipulación posterior de estas, de modo que puedan ser empleadas por otros softwares de diseño, como SolidWorks®, sin necesidad de realizar ningún cambio. Además, esto permite seleccionar tantas coordenadas como sean necesarias, sin necesidad de tener que guardar cada coordenada tomada. En el caso de querer dejar de tomar datos únicamente es necesario mantener presionado el botón del lápiz unos segundos.

Además del código, se ha elaborado una interfaz al software, la cual hace más amigable el trabajo y más intuitivo, ya que no se utiliza directamente la consola. En esta interfaz, la cual se puede visualizar en la Figura 3.2, se observan una serie de opciones, como pueden ser “Obtener coordenadas”, la cual permite al usuario utilizar el lápiz del háptico y seleccionar las coordenadas que se desean obtener presionando el botón. Además, con esta opción, todas las coordenadas se guardan en un archivo de texto como se ha explicado anteriormente. Otra de las opciones es “Abrir archivo”, la cual permite abrir el documento, donde se encuentran almacenadas todas las coordenadas, con el fin de visualizarlas y poder trabajar con ellas, o simplemente comprobar que se están guardando correctamente. Por otra parte, existe otra opción, denominada “Borrar archivo”, la cual permite eliminar el documento donde se encuentran las coordenadas guardadas, cuando estas ya no sean de interés, y se quiera crear otro archivo distinto. En el caso de intentar abrir un documento tras haberlo borrado, el software avisa de

que no hay ningún archivo disponible, con un mensaje de advertencia. Por último, si se desea cerrar la aplicación, se puede presionar la “X”, o bien, pulsar la opción “Exit”, la cual cierra todo completamente.



Figura 3.2. Interfaz de usuario del software de obtención de coordenadas del dispositivo háptico Phantom Omni.

Para poder emplear este código, es necesario que el dispositivo háptico esté conectado al ordenador por fireware, como ya se ha mencionado, pero, además, debe estar alimentado con la fuente de alimentación. Si este dispositivo no se encuentra conectado de este modo, el código devuelve error, ya que no detecta a ningún elemento que se pueda emplear como háptico.

Una vez se obtienen las coordenadas tridimensionales de los puntos de interés empleando el dispositivo háptico, se realiza la validación con las coordenadas obtenidas por el software elaborado en MATLAB® en el apartado 2.2.2 del Capítulo 2.

En este proceso de validación es necesario tener varios aspectos en cuenta, los cuales son muy importantes con el fin de poder realizarla correctamente.

Uno de ellos hace referencia a las unidades con las que se obtienen estas coordenadas en MATLAB® y en el dispositivo háptico. Para poder compararlas de una manera adecuada y correcta, estas deben ser las mismas. El dispositivo, como ya se ha mencionado, realiza esta medición en milímetros, mientras que MATLAB® devuelve estas coordenadas en píxeles. Se quiere realizar la comparación en milímetros, por lo

que las coordenadas obtenidas por el dispositivo háptico no se tienen que modificar. Sin embargo, con los valores en píxeles de MATLAB® debe realizarse una conversión.

En este cálculo de conversión de píxeles a milímetros, deben considerarse algunos aspectos de la imagen, como son las coordenadas correspondientes en píxeles, la densidad de la imagen, y la relación existente entre pulgadas y milímetros.

Este cálculo se aplica para las coordenadas XYZ obtenidas por MATLAB® para cada marcador. Primero se calcula con la coordenada X, posteriormente la Y, y por último la Z. La expresión (3.1) determina como realizar esta operación.

$$\text{Coordenada en mm} = \frac{\text{Coordenada en píxeles}}{\text{Densidad en ppp}} \cdot 25,4 \frac{\text{mm}}{\text{pulgada}} \quad (3.1)$$

Una vez realizada esta operación, se pueden comparar ambas medidas sin ningún problema, y por lo tanto se pueden validar las coordenadas.

Sin embargo, hay otro aspecto a tener en cuenta, la dirección de los ejes XYZ empleados para obtener las coordenadas tridimensionales de los marcadores en MATLAB® y en el dispositivo háptico. En función de la posición en la que se coloque el dispositivo, este mide las coordenadas en unos ejes XYZ, cuya dirección puede ser distinta a los empleados por MATLAB®, es decir, si su plano XY se coloca de forma paralela al plano XY de los marcadores, la dirección positiva del eje X es hacia la izquierda, la del eje Y es hacia arriba, y la del eje Z y hacia delante. Estas direcciones positivas poseen sentido contrario a las de MATLAB®, pero la única diferencia apreciable es el signo de sus coordenadas, coincidiendo los ejes X, Y, Z. Sin embargo, si el plano XY del dispositivo háptico se coloca de forma perpendicular al plano XY de los marcadores, la dirección positiva del eje Z del dispositivo, coincide con la dirección positiva del eje X en MATLAB®, por lo que las coordenadas a comparar estarán calculadas en ejes distintos. Para una comprensión más sencilla, en la Figura 3.3 se pueden observar los ejes XYZ del dispositivo háptico.



Figura 3.3. Dispositivo háptico Phantom Omni con la dirección y sentido de sus ejes X, Y, Z.

Por esto, es importante colocar el dispositivo háptico en la posición frontal, en la cual los planos XY, tanto del dispositivo, como de los marcadores son paralelos, y se calculan las coordenadas XYZ de los marcadores en los mismos ejes XYZ de MATLAB®. La dirección positiva también hay que tenerla en cuenta, con el fin de poder dar solución a la diferencia de signos en las coordenadas resultantes. En este caso, los signos de las coordenadas obtenidas con el dispositivo háptico y con MATLAB® son contrarios, debido a la dirección positiva de sus ejes XYZ. En la Figura 3.4 se puede observar el posicionamiento adecuado del dispositivo Phantom Omni y los marcadores reflectantes en el modelo anatómico, con el fin de obtener coordenadas válidas.

Una vez se consideran todos estos aspectos, se puede realizar la validación de las coordenadas obtenidas por el dispositivo háptico y por MATLAB® de los marcadores reflectantes en los puntos de interés de la estructura anatómica, de la cual se quiere estudiar la cinemática relativa entre elementos óseos.

El manual de uso del dispositivo háptico Phantom Omni se puede encontrar en el Anexo A.

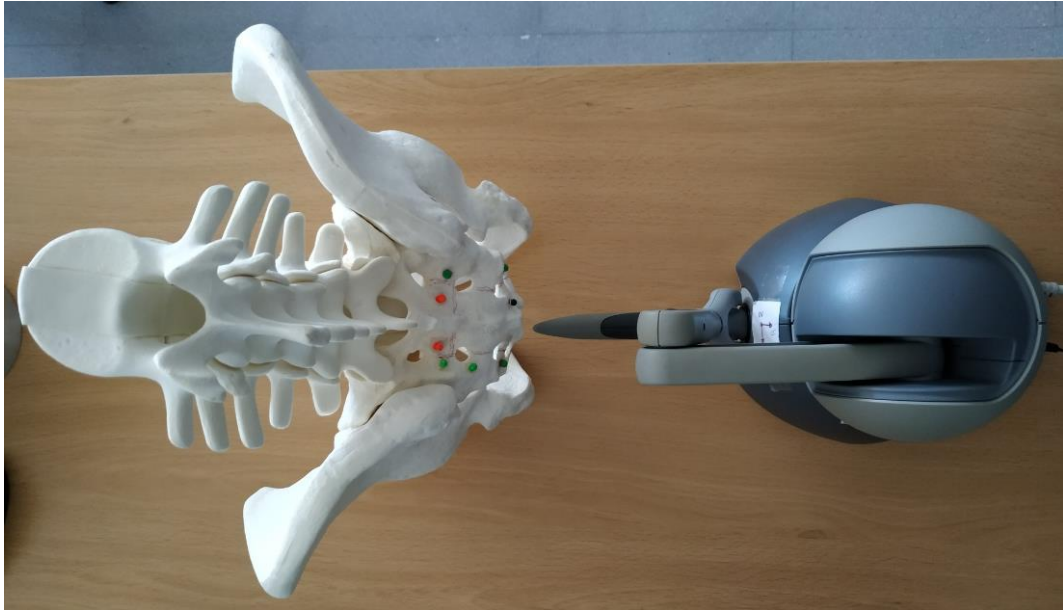


Figura 3.4. Modo de posicionamiento del dispositivo háptico Phantom Omni y el modelo anatómico con los marcadores reflectantes, con el fin de que los planos XY de ambos elementos coincidan y las coordenadas XYZ de los marcadores hagan referencia a los mismos ejes XYZ tanto en el dispositivo háptico como en el software desarrollado en MATLAB®.

3.2 Precisión de detección de los marcadores

Se ha elaborado un segundo método de validación del sistema de videogrametría desarrollado en este proyecto. Este, a diferencia del dispositivo háptico, no permite validar las coordenadas tridimensionales obtenidas, sin embargo, posibilita un cálculo de la precisión y error en la obtención de las coordenadas de los marcadores reflectantes por parte de las dos cámaras empleadas, o los sistemas de captura empleados en su lugar.

Este sistema consiste en la realización de diversas fotografías consecutivas, colocando la estructura anatómica a estudiar con los marcadores reflectantes a una distancia determinada, e ir aumentando esta distancia en 15 cm en cada fotografía tomada. Se empieza tomando las capturas a una distancia de 75 cm y se alcanzan los 4 metros y 20 centímetros.

Durante la realización de estas fotografías no se debe producir ninguna modificación en la localización de la cámara y la estructura anatómica a estudiar, únicamente debe desplazarse sin ningún tipo de rotación. De este modo, se puede estudiar la capacidad de detección de los marcadores reflectantes conforme aumenta la distancia.

Se realizan entre 20 y 30 fotografías con el fin de poder analizarlas posteriormente, y tener cantidad de información suficiente para tener un veredicto. En la Figura 3.5 se pueden observar una serie de imágenes tomadas a distintas distancias con el fin de emplearlas en este sistema para determinar la precisión de detección de los marcadores.

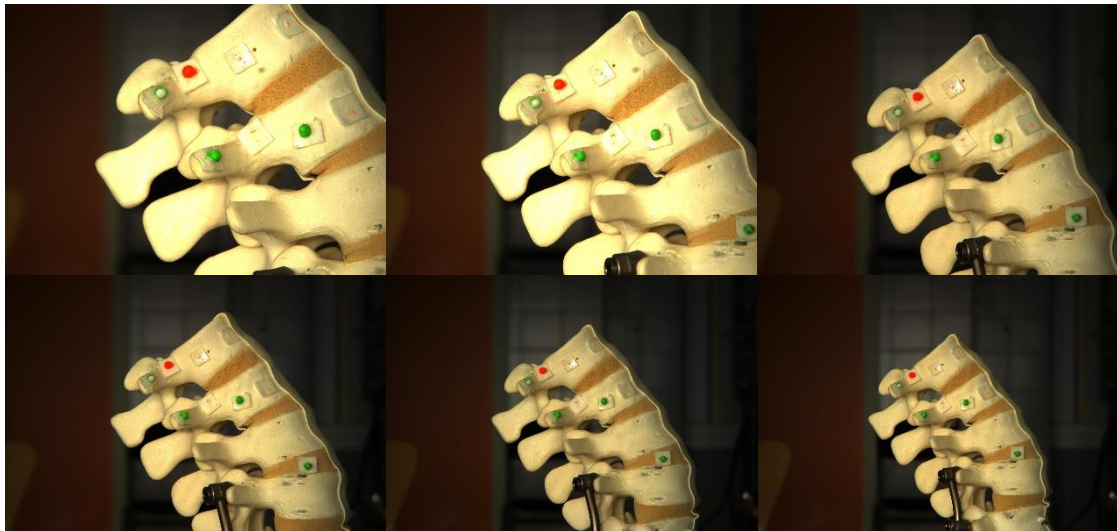


Figura 3.5. Imágenes tomadas a distintas distancias con el fin de determinar la precisión de detección de los marcadores con el sistema desarrollado en el apartado 3.2. Las imágenes oscilan desde una primera distancia, entre el sistema de captura de datos y el modelo, de 75 cm hasta 150 cm, aumentando esta 15 cm en cada fotografía nueva.

Una vez se han tomado todas las fotografías necesarias, del mismo modo que se ha representado en la Figura 3.5, se procesan mediante un código diseñado específicamente para este análisis. Antes de ejecutar el código, se realiza una medición de los píxeles de diámetro que poseen los marcadores en cada fotografía. Los valores medidos serán esenciales para realizar la comparación con los obtenidos por parte del sistema de videogrametría.

El código elaborado hace uso de las fotografías tomadas, y en él, al ejecutarlo, se debe realizar una medición del diámetro de los marcadores de la primera fotografía, con el fin de tener una medida inicial. Tras esto, se determina el número de marcadores presentes en cada fotografía. Una vez conseguido esto, se aplica el mismo procedimiento de detección de los marcadores que el explicado en el sistema de videogrametría en el apartado 2.2.3. Sin embargo, el paso de corrección de la distorsión

y triangulación no se realiza. En su lugar, solo se consideran las coordenadas en dos dimensiones de los marcadores en la estructura anatómica.

Como se explicó en el apartado 2.2.3 sobre el sistema de videogrametría, al obtener la posición de estos marcadores, se obtiene su centroide y radio. En este código se emplea ese radio calculado, ya que una vez se poseen los radios de todos los marcadores en todas las fotografías tomadas, se realiza la comparación de estos valores con los diámetros medidos inicialmente. De este modo, se puede obtener el error que se comete en la medición de los radios de los marcadores, y, por tanto, determinar la precisión y error en la detección haciendo uso de las cámaras y el software.

Una vez determinadas las diferencias entre los diámetros, obtenidos de forma manual en las fotografías, y mediante el sistema de videogrametría, se realiza la inversa a estos, de modo que cuanto menor sea el error, mayor es el resultado obtenido, es decir, la precisión. Sin embargo, si la diferencia es grande, la precisión que se obtiene al realizar la inversa es menor.

Tras la obtención de las precisiones en la detección de los marcadores en las fotografías tomadas, se grafican, de modo que se puede observar la distancia a la que se toma la fotografía, y la precisión correspondiente. Esto se realiza con el fin de poder determinar el rango de distancias en el que se obtienen las mejores precisiones en cuanto a la detección de las posiciones de los marcadores se refiere.

Estas distancias actúan como elementos esenciales a la hora de posicionar las cámaras en el momento de la captura de vídeos de la estructura anatómica con los marcadores reflectantes indicando los puntos de interés, con el fin de conocer la cinemática relativa entre los elementos óseos. Es decir, según el rango de distancias de mejor precisión, las cámaras se colocarán en una localización en la que la distancia a la estructura anatómica se encuentre en ese rango, y, por lo tanto, pueda asegurarse una buena precisión de detección de los marcadores.

El código empleado en este sistema se observa en el Anexo E.

4

Adaptación del sistema de medida a registros con dispositivos móviles

En este proyecto se ha desarrollado un sistema que permite la obtención de coordenadas tridimensionales de unos marcadores reflectantes, situados en unos puntos específicos de Interés, a partir de sus coordenadas en dos dimensiones, obtenidas empleando dos cámaras situadas en posiciones y orientaciones distintas, con el fin de estudiar de la cinemática relativa entre las estructuras óseas Involucradas en el movimiento que se produce, y del que se desea obtener una mayor Información. Esto se describe de una forma más detallada en el Capítulo 2.

Sin embargo, para poder hacer uso de ese sistema, se necesita contar con una serie de materiales, entre los que se encuentran las dos cámaras, es decir, los sistemas de captura de Imágenes y vídeos, con el fin de poder grabar el movimiento de los marcadores conforme avanza el tiempo, y poder obtener, posteriormente, los frames a procesar. Estas cámaras se tratan de elementos que poseen unas características específicas y un coste elevado, debido a las prestaciones que ofrecen. Además, el propio

software "Baumer Camera Explorer®" permite, mediante un trigger, sincronizar ambos dispositivos, lo que es esencial para conseguir finalmente que todos los frames de ambos vídeos hagan referencia a la misma situación, y, por tanto, poder analizar las coordenadas de los marcadores, sin problemas de concordancia del espacio y tiempo de cada frame.

Por todo esto, se ha desarrollado una adaptación de ese sistema, con el fin de poder aplicarlo con, al menos, dos teléfonos móviles, lo cual reduce considerablemente el gasto de adquisición del sistema de captura de imágenes y vídeos, y permite conseguir un sistema más económico y de aplicación sencilla a nivel de usuario.

En este sistema se ha tenido especial atención al hecho de que los dos dispositivos móviles no poseen ningún software propio, el cual permita sincronizar la captura de vídeos de ambos, con el fin de que los frames hagan referencia al mismo espacio en el mismo instante de tiempo. Por lo que, el principal problema a tratar se ha centrado en ese aspecto.

4.1 Materiales

Como ya se ha mencionado previamente, uno de los puntos de interés para la realización de esta adaptación, es conseguir un sistema de obtención de coordenadas tridimensionales de una serie de marcadores reflectantes, colocados en unos puntos de interés en una estructura óseas con el fin de estudiar un determinado movimiento y la evolución de estos en función del tiempo, empleando elementos que permitan reducir el coste económico que supone la adquisición de todos los materiales necesarios. Además de desarrollar un sistema de aplicación a nivel de usuario, ya que los elementos sobre los que se centra el procedimiento son dos teléfonos móviles.

Los teléfonos móviles son dispositivos, que hoy en día están presentes en cualquier ámbito de nuestra vida. Además, se puede encontrar un amplio rango de precios, permitiendo adquirirlos en función de la cantidad a gastar.

Por ello, los elementos más importantes de esta adaptación son estos teléfonos. Además, cabe destacar que la mayoría de ellos proporcionan cámaras con una buena

óptica y resolución, lo cual ayuda en el desarrollo del sistema. Sin embargo, este se trata de un aspecto a valorar, debido a que afecta a la precisión de captura de vídeos, y al posterior procesamiento de ellos, y obtención de coordenadas tridimensionales. Es esencial que ambos teléfonos cuenten con su software propio de captura de imágenes y vídeos. No es necesario poseer un modelo específico de dispositivo móvil, aunque sería de interés que ambos contaran con la misma apertura.

Tras esto, el resto de materiales es similar a los empleados en el sistema de videogrametría del capítulo 2. Es decir, es imprescindible contar con dos trípodes, como los de la Figura 2.4, en este caso de la marca MANFROTTO y modelo 808RC4, con el fin de poder equilibrar ambos dispositivos, y evitar movimientos indeseados durante la grabación, lo cual puede afectar a los frames obtenidos.

Por otra parte, también es necesario tener a disposición modelos anatómicos sobre los cuales se quiere realizar el estudio del movimiento. En estos modelos, mostrados en la Figura 2.7, se identifican los puntos de interés, los cuales se evalúan conforme avanza la situación, para poder observar los cambios en la posición de unos con respecto a otros, y, por lo tanto, permite obtener la cinemática relativa entre los elementos óseos que se encuentran involucrados. Estos modelos anatómicos son los mismos que se indicaron en el Capítulo 2, compuestos de espuma de poliuretano rígida de Sawbones (Sawbones®, Pacific Research Laboratories Inc., USA).

Para identificar esos puntos de interés, se emplean marcadores reflectantes, al igual que en el sistema de videogrametría del Capítulo 2. Estos marcadores, como los de la Figura 2.14, se encuentran cubiertos por una pintura, la cual se refleja ante la presencia de luz negra o luz ultravioleta, debido a la longitud de onda de esta. Estos se encuentran desarrollados en el apartado 2.3 del Capítulo 2.

Al emplear los marcadores reflectantes, también es necesario contar con la presencia de un sistema de iluminación con luz negra. Estas luces, mostradas en las Figuras 2.15 y 2.16, actúan sobre la pintura de los marcadores, haciendo que se iluminen y se puedan identificar las posiciones de todos ellos con respecto al resto de elementos. Como

sistema de iluminación se puede emplear el arco diseñado en este proyecto, y desarrollado en el apartado 2.4 del Capítulo 2.

Además de los elementos mencionado, se necesita el software de análisis de los frames de los vídeos desarrollado en el apartado 2.2 del Capítulo 2, debido a que este es el que permite obtener las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectantes. Aun así, se ha adaptado a la presencia de los dispositivos móviles, por lo que no es exactamente el mismo software.

Finalmente, hay que contar con un ordenador con el que poder ejecutar este sistema, el cual no debe poseer como sistema operativo Windows 7 o superior. Además, como un mínimo debe tener 4GB de RAM, pudiendo ser recomendable 8 GB. No necesita ninguna tarjeta gráfica en particular.

4.2 Preparación del sistema

Una vez se disponen de los elementos descritos en el apartado 4.1 se realiza la preparación del entorno, con el fin de poder obtener vídeos con ambos dispositivos móviles de la forma más correcta posible para el posterior procesado de ellos.

Para ello, se debe trabajar con la estructura anatómica, de la cual se quiere estudiar la cinemática relativa en un movimiento determinado. Este modelo se debe situar en la posición deseada y con una orientación en la que los puntos de interés se puedan visualizar sin problema por parte de los dispositivos móviles. El modelo se debe fijar a esa localización, con el fin de que siempre se mantenga en esa región, y los desplazamientos que sufra sean únicamente debidos al movimiento a estudiar.

Tras esto, se deben identificar aquellos puntos que son de interés, y de los cuales se quiere estudiar la evolución en el tiempo durante el movimiento. Estos se deben identificar con tantos marcadores reflectantes, explicados en el apartado 2.3 del Capítulo 2, como puntos haya. La fijación de los marcadores debe ser estable, sin probabilidad de que puedan separarse del modelo anatómico durante el estudio.

Una vez identificados todos los puntos de interés, se debe colocar el sistema de iluminación con luz negra, de modo que alcance todos los marcadores de forma completa. Este es uno de los aspectos que pueden producir una mayor variabilidad en los resultados obtenidos, debido a que es importante que esta luz abarque el marcador por completo, evitando dejar regiones de este sin iluminar. Si esto se produce, puede dar lugar a fallos en la identificación del centroide, y, por tanto, de las coordenadas tridimensionales del marcador, produciendo una pérdida de precisión en el estudio de la cinemática relativa a las estructuras óseas.

Al colocar este sistema de iluminación, se debe prestar especial atención a la luz natural recibida, debido a que esta puede ocultar la luz negra, y, por tanto, reducir el efecto de esta. Por ello, se debe trabajar en un entorno oscurecido, en el que no entre luz natural de un modo directo. Además, se debe evitar que se generen reflejos ni zonas muy brillantes, las cuales pueden confundir al algoritmo y producir fallos en el procesado de los vídeos.

Una vez establecidos todos los elementos que afectan al modelo anatómico, se deben situar ambos teléfonos móviles en los trípodes, de modo que ambos estén orientados hacia la región que se desea estudiar, pero en posiciones y orientaciones distintas, con el fin de conseguir abarcar el mayor campo posible. Una vez estos dispositivos están fijados en los trípodes, no se debe producir ningún cambio en su localización durante todo el proceso. Esta preparación del entorno es similar a la llevada a cabo en el apartado 2.2.2 del Capítulo 2, por lo que se puede observar en la Figura 2.9, siendo la única diferencia el uso de dispositivos móviles en el lugar de las cámaras Digital Baumer.

Antes de comenzar la obtención de vídeos para su procesado, se deben obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de los dispositivos móviles. De modo que se pueda establecer una relación entre la posición y orientación de cada teléfono con respecto a la región observada del modelo anatómico. Este proceso se realiza de la misma forma que como se ha explicado en el apartado 2.2.2 del Capítulo 2. Por lo que, para ello se debe emplear MATLAB®, el tablero de cuadros blancos y negros de la Figura 2.10, y la herramienta “Stereo Camera Calibrator” presente en MATLAB®.

Para este proceso se puede emplear la luz natural, ya que no es necesario captar la localización de los marcadores, sino únicamente la posición y orientación del tablero en función de la localización del móvil.

Para ello, se obtienen imágenes simultáneas en ambos dispositivos de la localización percibida por cada uno de ellos del tablero, de modo que MATLAB®, empleando la herramienta mencionada previamente, es capaz de establecer una relación de posición y orientación de cada teléfono en función de la imagen captada, obteniendo los parámetros extrínsecos e intrínsecos necesarios para la triangulación y corrección de la óptica necesarias para la obtención de las coordenadas tridimensionales deseadas.

Es importante que las imágenes se capten de manera simultánea, con el fin de determinar qué región del tablero de cuadros negros y blancos observa cada dispositivo en función de su localización. Además, se deben evitar imágenes borrosas, y se tienen que visualizar todos los recuadros en todas las imágenes, de modo que MATLAB pueda establecer una correspondencia entre las regiones observadas por ambos dispositivos en el mismo tiempo.

Otro de los aspectos que hay que tener en cuenta, a diferencia de cuando se emplean dos cámaras como sistema de captura de datos, es saber cuáles son las dimensiones de las imágenes tomadas por cada dispositivo, debido a que la herramienta "Stereo Camera Calibrator" requiere que todas las fotografías posean las mismas, con el fin de realizar una correspondencia correcta entre los cuadros detectados en una imagen y la otra. Por lo que, si no son iguales, es necesario realizar un dimensionamiento a estas, previo a su introducción en la herramienta de MATLAB® para calcular los parámetros de ambas cámaras.

Finalmente, se realiza la captura de vídeos por ambos teléfonos móviles. Para ello no es necesario emplear ningún software específico, únicamente el propio de cada dispositivo para activar la cámara. No es necesario establecer ninguna configuración determinada, pudiendo emplearse la que viene por defecto. Además, en este momento se debe

utilizar el sistema de iluminación con luz negra. Es importante que durante la grabación no se pierda ningún marcador, o quede tapado por alguna región ósea.

Además, cabe destacar el hecho de que ambos dispositivos móviles no tienen la necesidad de grabar de forma sincronizada, es decir, cada dispositivo puede empezar a grabar en un momento distinto, siempre y cuando ambos capten el período de tiempo en el que se produce el movimiento deseado en el modelo anatómico.

Esto significa que un dispositivo puede empezar la obtención del vídeo en tiempo 0, mientras que el otro puede comenzar en tiempo 2, teniendo en cuenta que el movimiento a estudiar en las estructuras óseas debe comenzar, por tanto, después del tiempo 2, con el fin de que sea captado por ambos dispositivos. Al producirse esto, el período de tiempo de interés del movimiento es el mismo, pero se encuentra en distintos instantes dentro de cada vídeo.

Además, un aspecto esencial para el funcionamiento de esta adaptación es el hecho de que en el momento en el que se quiera comenzar a realizar el movimiento de interés, se debe producir un sonido superior al ruido de ambiente, y en el momento que se quiera finalizar, se debe realizar otro. Este sonido puede ser una palmada, u otro similar a la claqueta empleada en la industria cinematográfica. Ambos sonidos deben ser captados por ambas cámaras en ambos vídeos de forma simultánea. Esto permite el correcto funcionamiento del software de adaptación desarrollado, y, por tanto, la obtención de las coordenadas tridimensionales de todos los marcadores.

Una vez realizado este último paso, se poseen dos vídeos, uno de cada dispositivo móvil, que pueden tener duraciones distintas, pero que en ambos se recogen la región a estudiar, el movimiento deseado, y los sonidos de comienzo y finalización. Por lo que se realiza el procesado de ellos, empleando el software de sincronización desarrollado en este proyecto.

4.3 Herramienta de sincronización de imágenes

Empleando los vídeos obtenidos por ambos teléfonos móviles, captando la región de interés y el movimiento deseado para estudiar la cinemática relativa entre estructuras óseas, finalmente se puede obtener las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectantes.

Como se ha mencionado en el apartado 4.2, ambos vídeos necesariamente no tienen que poseer la misma duración, sin embargo, sí que deben contener el período de tiempo, en el cual se produce el movimiento de interés para estudiar la cinemática. Por lo que, en ambos vídeos se cuenta con la presencia de un sonido de inicio y de finalización, los cuales ocurren de forma simultánea en ambos.

Es importante destacar el hecho de que los dos sonidos ocurran de forma síncrona en ambos vídeos. Esto es debido a que, durante el proceso de grabación de la región de interés, el usuario emite un sonido para comenzar a realizar el movimiento de la estructura ósea, y otro sonido para finalizar este proceso. De modo que ambos sonidos se producen una única vez, y son captados a la vez por ambos dispositivos, lo que significa que cada sonido hace referencia a un instante determinado cada vídeo, pero de forma global corresponde con el tiempo de inicio del movimiento que se quiere estudiar. Del mismo modo, el sonido final determina el instante en el que se deja de tener en cuenta el resto de la grabación contenida en el vídeo, debido a que el movimiento ha finalizado.

Basado en esto, se desarrolla en este proyecto un software de sincronización de imágenes de vídeos, el cual permite obtener de varias grabaciones el periodo de tiempo entre un sonido de comienzo y uno de finalización, con sus correspondientes frames. De modo, que aunque ambos vídeos posean tiempos diferentes, el período a tener en cuenta y con el que trabaja es el que se encuentra entre ambos sonidos, los cuales como se ha mencionado, se captan a la vez por ambos dispositivos, por lo que la duración de ese período de interés en todos los teléfonos es idéntica, y hace referencia únicamente a los frames del movimiento que se desea estudiar, con el fin de obtener las coordenadas tridimensionales de los marcadores observados.

Por lo que, como resultado de la aplicación de este software de sincronización, se obtienen un conjunto de frames correspondientes al periodo de tiempo entre el sonido inicial y final. Esto ocurre para tantos vídeos como se necesiten. En este caso se emplean dos. Además, cabe destacar que los frames obtenidos de un vídeo, se encuentran sincronizados con los del otro vídeo, debido a que como se ha mencionado, los dos sonidos son captados de forma simultánea por ambos dispositivos. De este modo, se soluciona el problema de la desincronización, debida a no poseer un trigger o software que la permita.

El software desarrollado trabaja con cada uno de los vídeos obtenidos por parte de los teléfonos móviles. Sin embargo, es necesario cerciorarse que estos posean los sonidos de inicio y fin, y que hayan sido captados de forma simultánea.

Este software utiliza tanto el audio, como los frames de vídeo para realizar esta sincronización. El primer paso se trata de obtener el audio e información de este de ambos vídeos proporcionados. Además, de cada vídeo se obtiene una matriz de amplitudes de audios, de modo que esta tendrá tantas filas como amplitudes haya, y tantas columnas como canales activos tenga el dispositivo empleado para la grabación.

En este punto hay que destacar el tipo de audio del dispositivo, debido a que, si este es "mono", únicamente se posee un canal, ya que se escucha lo mismo por el izquierdo y por el derecho. Sin embargo, este puede ser "stereo", dando lugar a la presencia de dos canales, uno derecho y otro izquierdo, por lo que por un oído se escucha algo distinto a lo del otro. En el caso de realizar la grabación con un dispositivo ajustado a "stereo", la matriz mencionada posee dos columnas. Por ende, si este se encuentra ajustado a "mono", la matriz contiene una única fila.

Además de esta matriz de amplitudes, se obtiene la frecuencia del sonido, de modo que gracias a ella, realizando la inversa y obteniendo el período, se puede calcular el tiempo por el que transcurre este audio, y se realiza una correspondencia entre las amplitudes y el instante en el que se produce, de modo que cada instante de tiempo, posee una

amplitud asociada, la cual se corresponde con el sonido que se haya generado en ese momento del vídeo.

Gracias a esto, se poseen todas las amplitudes con su correspondiente instante dentro del vídeo, por lo que fácilmente se estudian todas las filas de la matriz, con el fin de determinar el instante concreto en el que se produce el sonido inicial y el final. Antes de realizar este análisis, es necesario trabajar con un único canal, debido a que solo se quiere disponer de una matriz con una única columna, ya que los sonidos de inicio y fin se producen a la vez en ambos canales, por lo que es suficiente con trabajar con uno solo, ya que la información extraída es la misma, debido a que el único cambio que se puede producir es la amplitud de estos sonidos. En función de la correspondencia establecida entre el tiempo y las amplitudes, se puede graficar, con el fin de tener una visión general de todo el audio, lo cual se obtendría de forma similar, en función de los vídeos empleados, a lo que se muestra en la Figura 4.1.

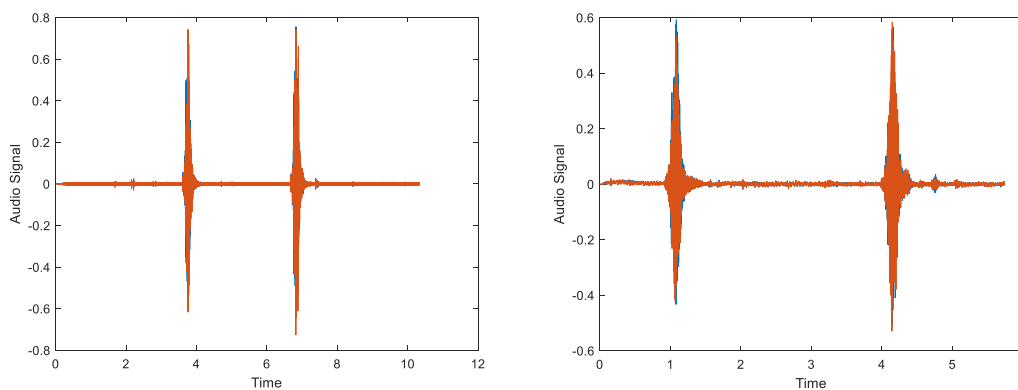


Figura 4.1. Gráficas de los audios completos resultantes del procesamiento de dos vídeos de dos dispositivos móviles, en cuyos vídeos se han emitido dos sonidos, uno de inicio y otro de fin, los cuales han sido captados de forma simultánea por ambos.

Tras esto, cabe destacar que los sonidos de inicio y fin, de los cuales se puede observar una representación en la Figura 4.1, son muy superiores al ruido de ambiente, por lo que, a la hora de evaluar las filas de la matriz, se pueden identificar fácilmente, debido a que la amplitud de estos es varios órdenes de magnitud superior al sonido ambiente.

Debido a esto, se evalúa esa columna de la matriz de amplitudes, hasta encontrar un primer instante en el que la amplitud comienza a aumentar. Este hace referencia al

momento en el que comienza a producirse el sonido de inicio. Por lo que, se puede determinar ese instante como tiempo inicial a tener en cuenta en la obtención de los frames del video. Cabe destacar el hecho de que, a partir de este sonido, se produce el movimiento de interés, por lo que es necesario que este tiempo se corresponda con algún instante durante este sonido, y no el momento en el que este finaliza, con el fin de poder captar la máxima información posible desde que el sonido comienza a producirse.

Una vez se ha determinado este tiempo de inicio, se sigue evaluando las filas de la matriz de amplitudes desde la que corresponde con el tiempo de inicio, con el fin de encontrar el instante en el que la amplitud vuelve a tener un valor normal, debido a que el sonido de inicio ha finalizado, y solo se está produciendo ruido de ambiente. Este instante se corresponde con el momento de fin de este sonido, lo cual es útil para determinar el momento a partir del cual se puede comenzar a buscar el sonido final.

Por lo que, a partir del instante de finalización del sonido de inicio, comienza la búsqueda por las filas de la matriz del instante de tiempo, en el cual vuelve a producirse un aumento de la amplitud debido al sonido final. Una vez se ha determinado, se obtiene el instante de tiempo que le corresponde a esa amplitud, y, por tanto, se obtiene el momento en el que se produce el sonido de finalización. Este es importante, debido a que ambos vídeos pueden tener duraciones distintas, por lo que hay que restringir este período, tanto en el comienzo, como en el final.

Una vez determinados los instantes del sonido de inicio y fin en ambos vídeos, se puede comprobar como la duración de estos períodos es idéntica, debido al hecho de que los sonidos son captados de forma simultánea en ambos dispositivos móviles.

A partir de este momento, se trabaja con los frames del vídeo, por lo que el procesado del audio ha terminado. Para ello, se obtiene la información de cada vídeo, y se ajusta el tiempo actual (current time) de cada vídeo al tiempo inicial en el que se produce el sonido de inicio, de modo que se quiere tener en cuenta el vídeo a partir de ese momento.

Tras esto, se recorre el vídeo desde este instante, hasta el momento del sonido final, correspondiente con el tiempo final, y se almacenan todos los frames correspondientes a ese período. De modo que, gracias a esto, se poseen todos los frames de todos los vídeos involucrados que se encuentran entre ese tiempo inicial y final y que se encuentran sincronizados, haciendo referencia al movimiento de la estructura ósea a estudiar.

En este momento, cabe destacar un aspecto importante para el procesado posterior de todos estos frames, correspondientes a la región del modelo donde se encuentran los marcadores, los cuales hacen referencia a los puntos de interés de los cuales se desean obtener las coordenadas tridimensionales. Es de interés que ambos vídeos cuenten con el mismo número de frames en el período entre el tiempo inicial y el tiempo final, debido a que, de este modo, cada uno de ellos en un vídeo, posee una correspondencia con otro del otro vídeo, y se produce una sincronización perfecta, ya que hacen referencia a la misma región sin ningún desfase, por pequeño que sea. Por esto, es importante destacar el FPS o "frame rate", es decir, el número de frames por segundo que un dispositivo puede grabar. Se desea que los teléfonos móviles empleados para la captura de vídeo se ajusten, con el fin de que ambos la realicen con el mismo número de FPS. De forma normal se ajusta a 30 FPS. Además, también es importante que las dimensiones de los frames tomados sean idénticas, con el fin de evitar problemas de correspondencia entre las coordenadas de ambos vídeos. De forma general se ajusta a 1080 x 1920 píxeles.

Gracias a esto, debido a que la duración entre el instante inicial y final es la misma en los vídeos de ambos móviles, y, además, el FPS también lo es, obligatoriamente, el número de frames de ese período es exactamente el mismo, produciéndose una sincronización correcta.

De modo, que una vez que se poseen los frames correspondientes al período de tiempo entre el sonido inicial y final en ambos vídeos, y estando correctamente sincronizados, se emplea el software de videogrametría desarrollado en el apartado 2.2 del Capítulo 2, con el fin de procesar todos los frames y obtener las coordenadas tridimensionales correspondientes a los marcadores reflectantes. La única diferencia es que este

software en lugar de trabajar con vídeos completos ya sincronizados y capturados por las cámaras Baumer, se emplean directamente los frames del periodo de interés entre el instante inicial y final.

Finalmente, tras todo el procesado, se obtienen las coordenadas tridimensionales de todos los marcadores, esenciales para estudiar la cinemática relativa entre las estructuras óseas.

Gracias a esto, se ha desarrollado un sistema de sincronización de vídeos, los cuales no lo están inicialmente, obtenidos a partir de teléfonos móviles, sin la necesidad de emplear ningún trigger. Lo cual es esencial para conseguir una adaptación del sistema de videogrametría del apartado 2.2 del Capítulo 2, con el fin de reducir el coste económico del sistema de adquisición de vídeos y poder emplearlo fácilmente en una aplicación a nivel de usuario.

El código de la herramienta de sincronización desarrollada se observa en el Anexo D.

5

Pruebas y resultados

Los resultados descritos en este apartado hacen referencia a la aplicación del sistema de videogrametría desarrollado en el Capítulo 2, empleando, además, la adaptación para el uso de esta con dispositivos móviles elaborada en el Capítulo 4, con el fin de observar los resultados obtenidos de realizar el seguimiento de una serie de marcadores reflectantes, los cuales identifican unos puntos de interés en un modelo anatómico.

Los sistemas de captura de imágenes y vídeos se tratan de dos dispositivos móviles. Uno de ellos es el Xiaomi MI 8 lite, con una cámara de 12 MP, con sensor de imagen CMOS Sony IMX363 Exmor RS y con apertura de $f/1.9$. El otro dispositivo es un Redmi Note 8 Pro de 64 MP, con sensor de imagen CMOS Samsung Bright S5KGW1 y apertura $f/1.9$. Ambos dispositivos se muestran en la Figura 5.1.



Figura 5.1. Dispositivos móviles empleados en la captura de imágenes y vídeos. En la izquierda se observa el dispositivo Redmi Note 8 Pro, y en la derecha e Xiaomi Mi 8 Lite.

Además, se han empleado dos trípodes, los cuales se pueden observar en la Figura 5.2, con el fin de dar estabilidad a estos dispositivos móviles.



Figura 5.2. Trípodes empleados en la captura de imágenes y vídeos con dispositivos móviles.

El sistema de iluminación de luz negra empleado para obtener estos resultados se trata de una lámpara de luz negra de 20W, de forma conjunta con una bombilla, igualmente de luz negra, de 15W. Ambos elementos son idénticos a los observados en las Figuras 2.13 y 2.14.

En este caso, se ha empleado el modelo anatómico de una columna, mostrada en la Figura 2.5, específicamente de la zona lumbar, en la que se han identificado tres puntos de interés, con el fin de estudiar la evolución de estos en el tiempo, debido al movimiento que están sufriendo, mediante tres marcadores reflectantes.

Lo primero a realizar, es el uso del sistema de determinación de la precisión de la detección de los marcadores. Para ello, se han realizado 26 imágenes de la columna lumbar con los dispositivos móviles. En estas, se ha variado la distancia entre el modelo

anatómico y el sistema de captura de imágenes, por lo que estas oscilan entre 10 y 135 centímetros. Estas imágenes se han tomado como se muestra en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Imágenes tomadas con los dispositivos móviles, con el fin de determinar la precisión de detección de los marcadores con el sistema del apartado 3.2. Estas fotografías oscilan entre unas distancias, entre el dispositivo móvil y los marcadores, de 10 y 35 cm. El resto de imágenes tomadas llegan hasta los 110 cm.

Tras esto, empleando las imágenes de la Figura 5.3, se ha aplicado el sistema desarrollado en el apartado 3.2, gracias al cual se ha determinado la precisión y error de detección de los marcadores con estos dispositivos móviles, y el rango de distancias en el que se deben colocar los sistemas de captura de imágenes y vídeos, con el fin de obtener la mejor precisión de detección y menor error. La curva de precisión resultante de la aplicación de este sistema de validación se observa en la Figura 5.4.

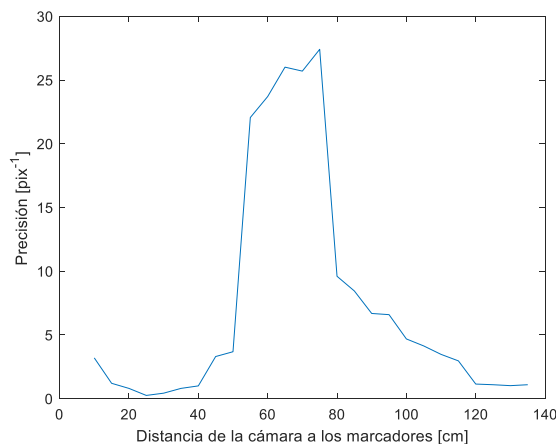


Figura 5.4. Curva de precisión de los dispositivos móviles empleados en la realización de esta prueba. El rango de distancias de colocación de estos se encuentra entre 40 y 80 cm entre el dispositivo y los marcadores.

En este caso, los errores menores se encuentran en un rango que oscila entre 40 y 80 centímetros, como se observa en la Figura 5.4. Si los dispositivos se colocan fuera de este rango, las imágenes y vídeos que obtenga del modelo con los marcadores poseerán una resolución inferior, y, por lo tanto, los marcadores perderán definición y el sistema de videogrametría no los detectará con la exactitud adecuada, dando lugar a fallos y errores en las mediciones.

Tras esto, se ha realizado el proceso de captura de imágenes, con el fin de obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de ambos dispositivos móviles. Previamente, se ha preparado el entorno para realizar el análisis completo, colocando los dispositivos móviles sobre los trípodes, y preparando el modelo anatómico con los marcadores reflectantes. Esto se observa en la Figura 5.5.



Figura 5.5. Preparación del entorno para la obtención de las imágenes empleadas para conseguir los parámetros intrínsecos y extrínsecos de cada dispositivo móvil.

Tras esto, se ha comenzado el proceso de obtención de los parámetros extrínsecos e intrínsecos, para lo cual se ha empleado la rejilla de calibración de cuadros blancos y negros. Se han obtenido 31 imágenes con cada dispositivo. La comparación entre las imágenes tomadas por ambos dispositivos móviles se observa en la Figura 5.6, en la que se puede apreciar, además, como capta cada dispositivo la rejilla de calibración empleada.

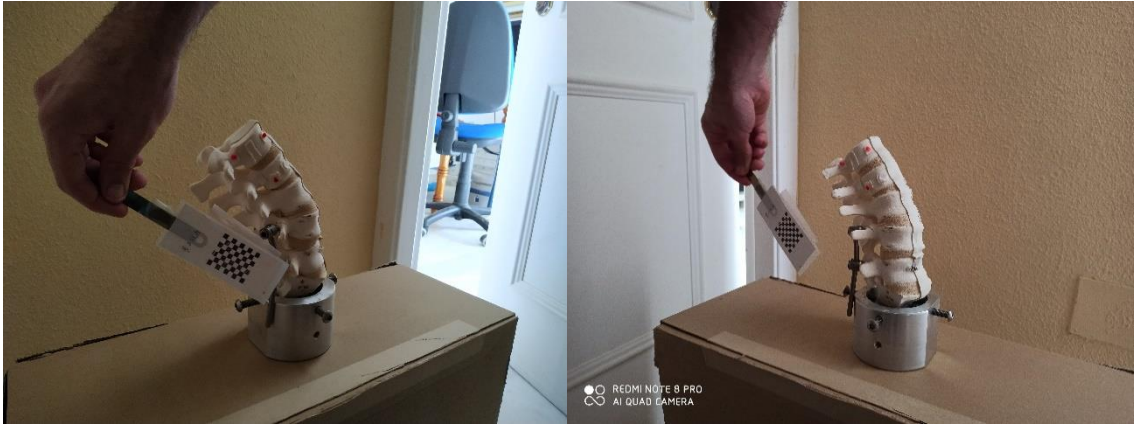


Figura 5.6. Imágenes captadas por los dos dispositivos móviles en el mismo instante de tiempo, y capturando al modelo anatómico de columna lumbar y la rejilla de calibración. Estas imágenes, junto con las 30 restantes se emplean para la obtención de los parámetros de ambos móviles. Se observa como el calibrador se encuentra en distintas localizaciones en cada imagen en función de la localización de cada dispositivo.

Tras esto, debido a que las imágenes obtenidas por ambos dispositivos no tienen las mismas dimensiones, se ha realizado un redimensionamiento de estas. Las fotografías obtenidas con el dispositivo Xiaomi MI 8 lite poseen un tamaño de 4032x3024 píxeles, mientras que las del sistema Redmi Note 8 Pro tienen unas dimensiones de 4624x3472 píxeles. Debido a esto, estas últimas imágenes se han redimensionado, con el fin de que posean las mismas dimensiones que el primer dispositivo, es decir, 4032x3024 píxeles. Finalmente, una vez las imágenes poseen las mismas dimensiones, se emplea la aplicación "Stereo Camera Calibrator" de MATLAB®, obteniendo los parámetros buscados, con un error de 5.59 píxeles. Los resultados obtenidos por esta herramienta se observan en la Figura 5.7.

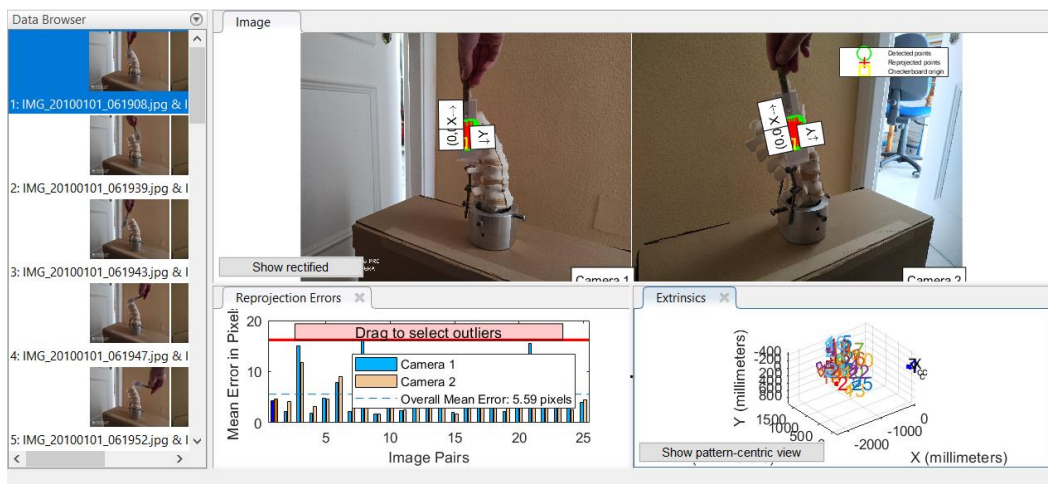


Figura 5.7. Resultados obtenidos del uso de la herramienta "Stereo Camera Calibrator". Se pueden observar dos imágenes, en la que, tras la calibración, se ha realizado una reproyección en base a los parámetros extrínsecos e intrínsecos. Además, se observa un error de 5.59 píxeles, y una gráfica de los parámetros extrínsecos.

Posteriormente, se han activado los sistemas de luces negras, y se han realizado dos vídeos, uno con cada dispositivo móvil. Este entorno se puede observar en la Figura 5.8.

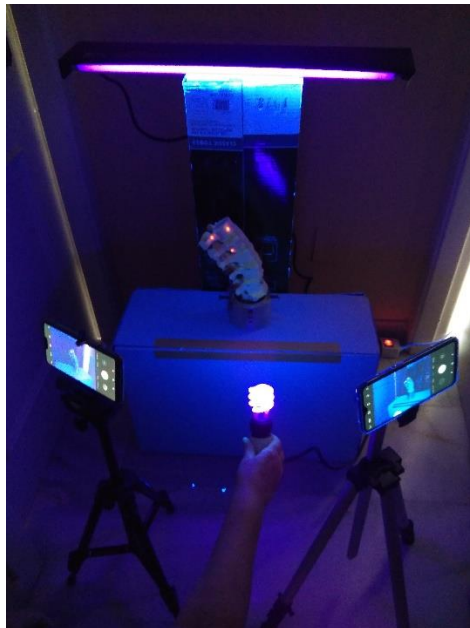


Figura 5.8. Preparación del entorno con los dispositivos móviles, modelo anatómico de columna lumbar y luces negras para la obtención de vídeos para su posterior análisis de los puntos de interés. Se pueden observar los tres marcadores completamente iluminados.

El movimiento a estudiar aplicado en este análisis y capturado por ambos vídeos se trata de una flexo-extensión. Una representación de este se puede observar en la Figura 5.9, en la que se puede apreciar tanto la flexión de columna, como su extensión y posición fisiológica, pudiendo determinar el camino que siguen los marcadores durante el movimiento.

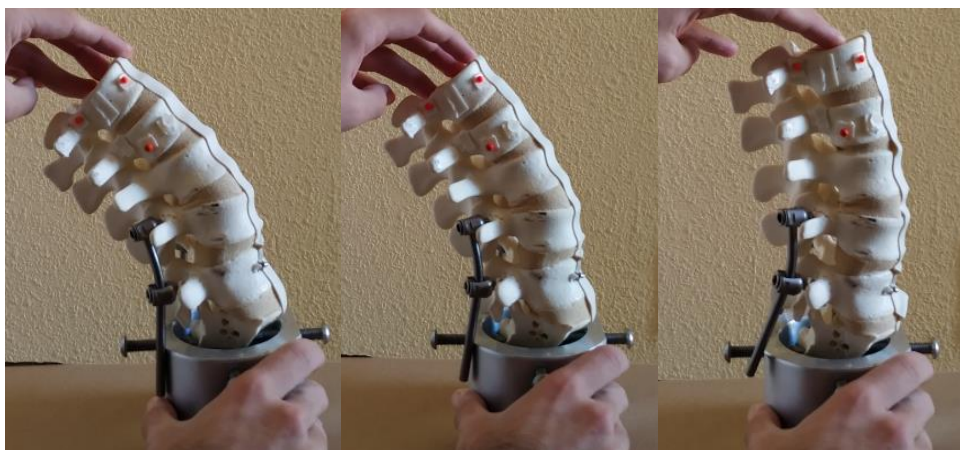


Figura 5.9. Movimiento de flexo-extensión de interés realizado por el modelo de columna lumbar durante la grabación de los vídeos. En la imagen de la izquierda se observa la extensión, mientras que en la de la derecha se aprecia la flexión. En la imagen central se visualiza la posición fisiológica de la columna.

Para realizar el análisis correctamente, en el momento en que se comienza a realizar este movimiento de interés mostrado en la Figura 5.9, se ha emitido un sonido superior al ruido de ambiente, para indicar el momento inicial. Finalmente, se indica otro sonido de finalización, cuando se haya terminado el movimiento. Estos sonidos son captados a la vez por ambos dispositivos.

Con estos vídeos, se ha aplicado el sistema de videogrametría desarrollado en el Capítulo 2, junto con la adaptación elaborada en el Capítulo 4. De modo que, empleando los vídeos, se ha detectado el instante inicial y final, correspondientes con los sonidos emitidos durante la grabación, y se han extraído los frames de ambos vídeos, correspondientes con ese período de tiempo. En la Figura 5.10 se observan las gráficas del audio de cada uno de los vídeos.

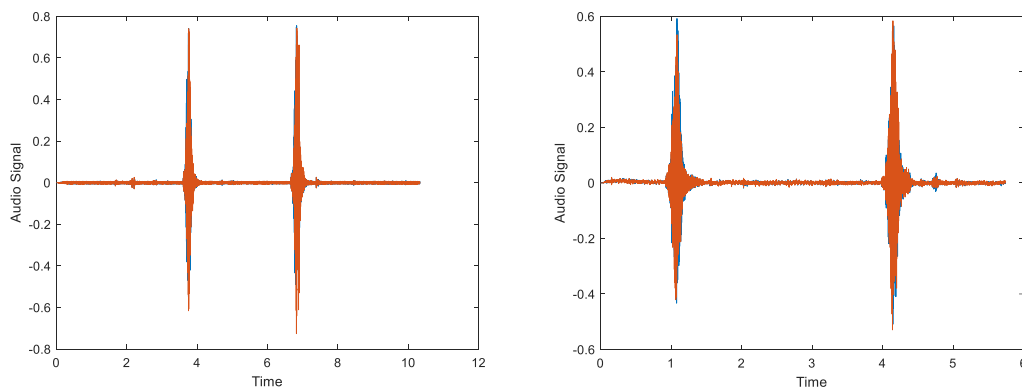


Figura 5.10. Gráficas de los audios completos resultantes del procesamiento de los dos vídeos de los dos dispositivos móviles, en las que se observan dos sonidos, uno de inicio y otro de fin, los cuales han sido captados de forma simultánea por ambos.

La duración entre el sonido inicial y final es la misma en ambos vídeos, y se trata de 3.07 segundos. Ambos dispositivos poseen un FPS de 30. Como ambos sistemas tienen la misma duración a procesar, y el mismo "frame rate", en el período de interés, se encuentra el mismo número de frames, por lo que los frames de un vídeo, poseen su correspondiente en el otro vídeo. En este caso, el período de interés posee 93 frames a procesar.

Una vez realizado esto por el sistema de videogrametría, el siguiente paso que realiza es la obtención de las coordenadas en 2D de los marcadores en los 93 frames de ambos

vídeos. En la Figura 5.11 se puede observar las imágenes resultantes de la obtención de las coordenadas en 2D en el frame 3 de ambos dispositivos móviles, de modo, que para todos los frames se obtienen imágenes similares, en las que se pueden observar los marcadores reflectantes, una circunferencia azul determinado el área de cada uno de ellos y una cruz roja indicando el centroide de estos. Únicamente se señalan los marcadores, evitando las sombras anaranjadas generadas por estos.

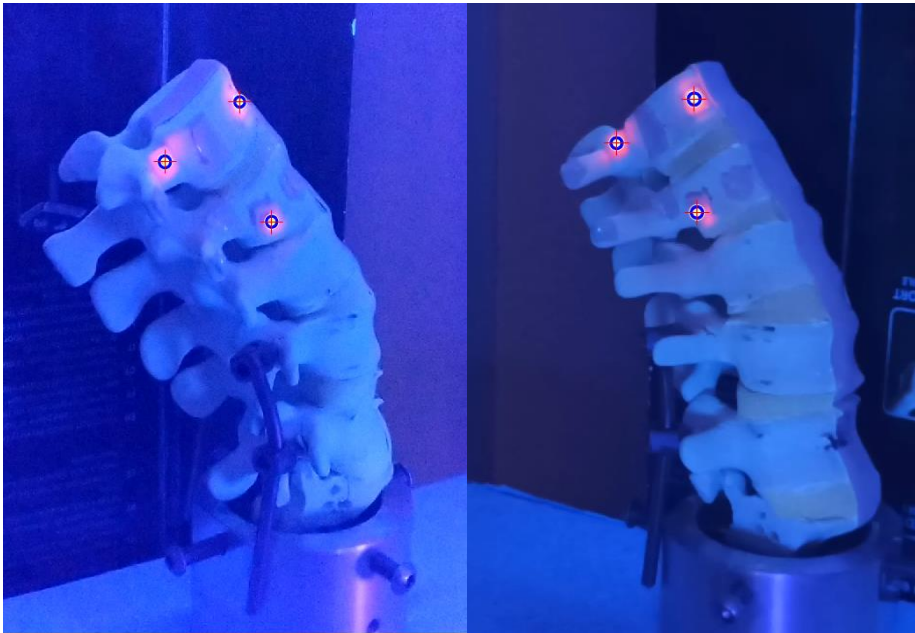


Figura 5.11. Detección de los marcadores reflectantes por parte del sistema de videogrametría desarrollado. En la imagen izquierda se observan los marcadores visualizados por el móvil Xiaomi Mi 8 Lite, y en la derecha la imagen del móvil Redmi Note 8 Pro. Ambas imágenes se corresponden con el frame 3 de cada uno de los vídeos.

Tras esto, empleando los parámetros intrínsecos y extrínsecos calculado previamente, se realiza la corrección de la distorsión de las coordenadas en 2D de los frames de ambas cámaras con sus correspondientes parámetros. Finalmente, empleando estos puntos, se realiza la triangulación, obteniendo las coordenadas tridimensionales de todos los marcadores en todos los frames.

Gracias a esto, se puede observar la trayectoria seguida por cada uno de los marcadores en el movimiento a estudiar, lo cual puede ser útil a la hora de realizar el análisis de la cinemática relativa entre elementos óseos, los cuales, en este caso, serían las vértebras de la zona lumbar de la columna. Las trayectorias de los tres marcadores se pueden observar en la Figura 5.12.

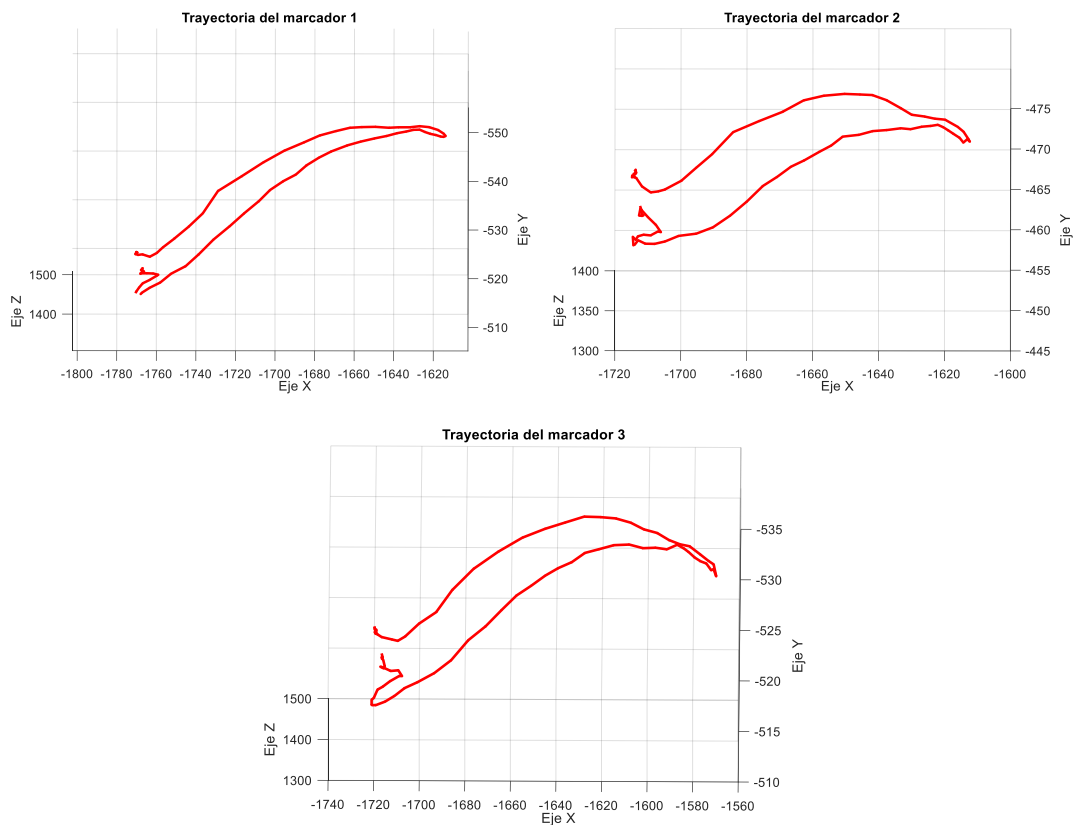


Figura 5.12. Trayectorias de los tres marcadores colocados en la columna lumbar basadas en las coordenadas tridimensionales obtenidas con el uso del sistema de videogrametría desarrollado.

La trayectoria obtenida y visualizada en la Figura 5.12 se corresponde con el movimiento de flexo-extensión de columna lumbar llevado a cabo en la Figura 5.9, y se adecua a lo esperado según este movimiento. Las diferencias entre las trayectorias de los marcadores se deben a que la columna no actúa como un sólido rígido, debido a que las vértebras se encuentran unidas entre sí por un material esponjoso que simula los discos intervertebrales, por lo que genera pequeñas diferencias en el movimiento de cada marcador.

Debido a los resultados obtenidos, y fuera del ámbito de este trabajo de fin de grado, se encuentran diversas aplicaciones que pueden llevarse a cabo empleando el sistema desarrollado.

Una de ellas sería una aplicación para ensayos de laboratorio orientada a material cadavérico o reproducciones sintéticas como la de la Figura 5.11. Empleando un modelo de columna lumbar con vértebras de la L1 a L5, y colocando tres marcadores en cada una de ellas y en posiciones anatómicas conocidas, se podría calcular el ángulo de flexión

entre la L1-L2 a lo largo de todo el ensayo, junto con la velocidad y la aceleración en esa flexión. Este ángulo de flexión sirve para estudiar el rango de movilidad cuando se evalúan tratamientos, como por ejemplo la colocación de fijadores intervertebrales o prótesis de disco. Mientras que la aceleración se utiliza como criterio para analizar el daño ante, por ejemplo, impactos en accidentes de tráfico, y comparar la eficacia de los sistemas de retención, puesto que la aceleración está ligada con las fuerzas de tracción sobre los ligamentos que pueden llegar a rotura causando lesiones graves o distenderse provocando lesiones leves por inflamación.

Otra de las aplicaciones sería el estudio de la cinemática de la marcha, colocando los marcadores del modo que se muestra en la Figura 5.13. Esta podría orientarse a completar el sistema de adaptación empleando dispositivos móviles para proporcionar a los fisioterapeutas un sistema económico, en el cual, empleando los marcadores en puntos anatómicos conocidos, les permitiesen calcular la flexión dorsoplantar y si hay movimiento de varo-valgo en la marcha, evoluciones que utilizan para estudiar cualquier patología de esta y la eficacia de sus tratamientos.



Figura 5.13. Modo de colocación de los marcadores reflectantes para el estudio de la cinemática de la marcha. Un marcador se debe situar en la punta del pie, otro en el tobillo, y el último en el punto medio de la tibia. En la izquierda se observa la imagen obtenida por el dispositivo móvil Xiaomi Mi 8 Lite, mientras que en la derecha se emplea el sistema Redmi Note 8 Pro.

6

Conclusiones y líneas futuras

En este proyecto de fin de grado se ha desarrollado la definición de un protocolo de caracterización de la cinemática relativa entre elementos óseos en base a datos de videogrametría 3D. El concepto de videogrametría surgió hace tiempo, sin embargo, actualmente es cuando se está empezando a trabajar más con él. Principalmente se utiliza con el fin de obtener medidas en 2D utilizando una única cámara. Sin embargo, en este trabajo se ha desarrollado un sistema para obtener medidas tridimensionales, empleando dos cámaras de vídeos sincronizadas, con un volumen de trabajo adaptado a las dimensiones de la articulación humana con la que se trabaja y buscando alta precisión en las medidas obtenidas. En general, se trata de un proyecto muy novedoso en el ámbito del análisis biomecánico y en cuanto al material empleado para su realización.

En el desarrollo de este sistema, se desea identificar una serie de puntos de interés en la estructura anatómica a estudiar, con el fin de determinar la trayectoria que siguen en un determinado movimiento, y poder, posteriormente, determinar las coordenadas tridimensionales, con el fin de estudiar la cinemática relativa entre los elementos óseos

involucrados. Para esto, se han empleado marcadores reflectantes, un aspecto muy novedoso en el ámbito de la videogrametría. Se ha llegado a la conclusión de que estos marcadores deben estar cubiertos con una pintura que se ilumine con la longitud de onda de la luz negra empleada en el sistema de iluminación. Además, este recubrimiento debe ser homogéneo, evitando dejar zonas sin pintar, debido a que, si esto ocurre, en el proceso de detección de los marcadores, habrá zonas que no se identifiquen y afecte a las coordenadas del centroide, y al radio de este.

Por otra parte, se desarrolla un sistema de iluminación basado en luz negra como se ha mencionado anteriormente. Esta luz únicamente ilumina determinadas superficies, y hace que unos colores resalten sobre otros. De modo, que al emplear una pintura que se ilumina con la longitud de onda de esta luz en los marcadores, el sistema de iluminación permite que estos, los cuales identifican los puntos de interés, resalten con respecto al resto de regiones de la estructura anatómica, facilitando su identificación por el software desarrollado. Con este sistema de iluminación se ha llegado a la conclusión de que es un aspecto crucial para el funcionamiento del sistema de videogrametría, debido a que en función de la cantidad de luz negra que incida sobre el marcador, en los frames de los vídeos capturados, sus píxeles tomarán un valor u otro, y en el caso de que estos no lleguen al valor determinado como mínimo, serán descartados. Por ello, es importante una muy buena e intensa iluminación sobre los marcadores, con el fin de que destaquen con respecto al resto de estructuras. Además, esta debe provenir de todas las direcciones, con el fin de evitar la generación de sombras, las cuales pueden producir que el centroide no se encuentre correctamente.

En cuanto a la preparación del entorno para la aplicación del sistema de videogrametría, se ha llegado a la conclusión de determinados aspectos a tener en cuenta, y que pueden influir considerablemente en el resultado obtenido, y en la validez de estos. Por un lado, se debe evitar que exista una gran cantidad de luz natural, ya que esta puede llegar a tapar o reducir el nivel de iluminación con luz negra, por lo que el entorno debe estar oscurecido. Por otra parte, también se debe evitar la presencia de elementos que puedan verse iluminados con esta luz negra, además de los marcadores, como hojas de papel, zonas brillantes, o elementos muy claros. Si no se evitan, pueden afectar al

trabajo del sistema de videogrametría, provocando que no se identifiquen correctamente los marcadores, ya que estas zonas se encuentran en el mismo rango de intensidad que estos.

Si se tiene en cuenta el movimiento realizado por parte de la estructura anatómica que se desea analizar y estudiar su cinemática, se ha llegado a la conclusión de que este movimiento debe poseer una velocidad constante, debido a que el algoritmo está preparado para ello, sin embargo, si en algún momento sufre una aceleración, puede ocurrir que este no sea capaz de determinar la posición actual del marcador en función de la posición en el frame anterior del vídeo, por lo que, a partir de ese momento, dejará de detectar marcadores, y por lo tanto, los resultados a partir de ese punto serán erróneos, y no válidos para el estudio posterior.

Los sistemas de captura de vídeos empleados en este proyecto también influyen en el procesamiento. Principalmente, el aspecto que actúa es la resolución de los vídeos grabados. Si esta es muy elevada, el software desarrollado tarda más tiempo en ejecutarse, por lo que el proceso de obtención de las coordenadas tridimensionales de los marcadores se va a ver retrasado. Sin embargo, si la resolución es baja, puede ocurrir que no se obtenga la información necesaria.

En cuanto a los sistemas de validación desarrollados, se han obtenido una serie de conclusiones a tener en cuenta durante el proceso de testeo, las cuales son fundamentales para obtener resultados correctos. Por un lado, se encuentra el dispositivo háptico Phantom Omni, el cual se ha adaptado con el fin de obtener coordenadas tridimensionales de cualquier punto de interés, con el objetivo de poder validar las coordenadas obtenidas por el software del sistema de videogrametría. Se ha concluido que, para obtener medidas válidas, es necesario posicionar el dispositivo háptico de forma que su plano XY sea paralelo al plano XY de los marcadores, de modo que, a la hora de detectar las coordenadas de estos, los ejes XYZ del dispositivo coincidan con los ejes donde MATLAB® trabaja, de modo, que se van a poder comparar fácilmente las coordenadas del software y las del dispositivo. Si esto no ocurre así, puede pasar que las coordenadas del eje X de MATLAB®, se correspondan con las coordenadas del eje Z

del dispositivo, dificultando esta comparación y validación. Otro aspecto a tener en cuenta son las unidades de las coordenadas, es decir, el software desarrollado en MATLAB® devuelve las coordenadas en píxeles, mientras que el dispositivo en milímetros, por lo que es necesario realizar la conversión adecuada.

En cuanto al algoritmo de obtención de la precisión en la detección de marcadores, se ha concluido que es necesario colocar las cámaras de vídeo en el rango de distancias obtenido que proporciona una mejor precisión, con el fin de obtener una detección eficaz, y mejores resultados.

Al tener en cuenta la adaptación llevada a cabo, con el fin de poder emplear el sistema de videogrametría usando dispositivos móviles para obtener una aplicación a nivel de usuario y con un coste menor, se ha concluido que los resultados obtenidos son bastantes buenos, con una precisión menor que en el uso de las cámaras "Digital Baumer", pero entendible debido a la óptica con la que cuentan estos dispositivos.

Finalmente, si se tienen en cuenta todos los aspectos descritos, se ha desarrollado un sistema de videogrametría capaz de detectar las coordenadas tridimensionales de los marcadores reflectantes en la estructura anatómica a estudiar con muy buena precisión, lo que permite el estudio de la cinemática relativa entre los elementos óseos involucrados, tal y como era el objetivo de este proyecto.

Cabe destacar el hecho de que el sistema de videogrametría desarrollado en este proyecto no está finalizado, es decir, todavía hay muchos aspectos que seguir investigando, y los cuales pueden producir una mejora sustancial en los resultados obtenidos. Por lo que, como líneas futuras se pueden encontrar las que se describen a continuación.

- Aumentar el número de cámaras y desarrollar y validar un procedimiento de localización optimizada de los marcadores con ese sistema. El objetivo será, no tanto para aumentar la precisión de la localización, que también se conseguiría, sino fundamentalmente monitorizar ensayos con grandes rasgos de movilidad

en varios ejes, en las que los marcadores quedaran ocultos en algunos instantes para algunas de las cámaras. Esta tarea obligaría a estudiar cómo utilizar la información redundante de la que se dispondrá cuando los marcadores sean captados por más de dos cámaras.

- Diseño de un sistema de instalación integrado, que permita posicionar y almacenar sobre un mismo soporte el sistema de iluminación, las cámaras y la rejilla de calibración. El sistema debería tener la movilidad suficiente para adaptarse a las tareas de calibración y registro, así como para cubrir el campo de trabajo de distintos ensayos.

Bibliografía

Calin, G., & Roda, V.O. (2007). *Real-time disparity map extraction in a dual head stereo vision system*. Latin American Applied Research, 37, 21-24.

Côrrea, D., & Balbinot, A. (2013). *Experimental videogrammetry and accelerometry for the 2D analysis of human motion*. Sensors & Transducers, 150(3), 79.

De Barros, R. M. L., Russomanno, T. G., Brenzikofer, R., & Figueroa, P. J. (2006). *A method to synchronise video cameras using the audio band*. Journal of biomechanics, 39(4), 776-780.

Documentación de Baumer. <https://www.baumer.com/us/en/>

Documentación de MATLAB®. <https://es.mathworks.com/>

Documentación de SolidWorks®. <https://www.solidworks.com/es>

Documentación de "Stereo Camera Calibrator".

<https://es.mathworks.com/help/vision/ug/stereo-camera-calibrator-app.html>

Documentación librería OpenHaptics® v3.5 <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/openhaptics> (Consultada el día 17 de febrero de 2020).

Gruen, A. (1997). *Fundamentals of videogrammetry—A review*. Human movement science, 16(2-3), 155-187.

Manual de uso “Digital Camera VCXU-124C”

https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_VCXU_124C_DS_EN.pdf?mediaPK=8881888755742 (Consultada el día 24 de febrero de 2020).

Manual de uso Phantom Omni de 3D Systems <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch> (Consultada el día 17 de febrero de 2020).

Remondino, F. (2006). *Videogrammetry for human movement analysis*. In Ninth international symposium on 3D analysis of human movement.

Sancho-Bru, J. L., Jarque-Bou, N. J., Vergara, M., & Perez-Gonzalez, A. (2014). *Validity of a simple videogrammetric method to measure the movement of all hand segments for clinical purposes*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 228(2), 182-189.

Sarro, K. J., Silvatti, A. P., Aliverti, A., & Barros, R. M. (2009). *Proposition and evaluation of a novel method based on videogrammetry to measure three-dimensional rib motion during breathing*. Journal of applied biomechanics, 25(3), 247-252.

Apéndice A

Manual de uso de la aplicación del dispositivo háptico

Este manual de usuario tiene como principal objetivo guiar por todos los pasos por los que la persona que emplee la aplicación de obtención de coordenadas con un dispositivo háptico debe pasar, con el fin de obtener coordenadas tridimensionales de un punto o conjunto de puntos específicos que sean de interés para el estudio o trabajo que se quiera realizar.

1. Elementos necesarios

Para poner en funcionamiento la aplicación, es necesario contar con una serie de elementos imprescindibles, sin los cuales los resultados no serían válidos, o no se podría ejecutar. Estos se tratan de:

- **Dispositivo háptico:** Se trata del dispositivo, el cual se encarga de permitir la selección del punto en el espacio del que se desea obtener las coordenadas tridimensionales. Para ellos cuenta con un lápiz, denominado stylus, cuya punta actúa de selector de posiciones.
- **Librería OpenHaptics®:** Es la librería propia de los dispositivos hápticos, y la cual permite la interacción entre el ordenador y estos, de modo que todo lo que perciba el dispositivo es transferido al computador, con el fin de que el usuario

pueda observarlo. Además, cuenta con una serie de funciones imprescindibles para el uso correcto de la aplicación.

- **Visual Studio:** Entorno de desarrollo necesario para poder trabajar con la librería. La aplicación se encuentra desarrollada sobre este entorno, y lo necesita para su ejecución.
- **Ordenador:** Dispositiv para poder ejecutar la aplicación. Sobre este se encuentra instalado el entorno de desarrollo Visual Studio y la librería OpenHaptics®. Como requisito indispensable se encuentra que este debe poseer conexión firewire para poder conectar el dispositivo háptico.

2. Instalación de la librería OpenHaptics®

Para poder utilizar la aplicación de obtención de coordenadas tridimensionales debe estar la librería OpenHaptics® para dispositivos hápticos instalada en el ordenador el cual se vaya a emplear para este propósito.

Para ello, se debe ir a la web de 3D Systems, el cual es el desarrollador tanto del dispositivo háptico, como de la librería. Una vez allí, se debe navegar en "Soporte", "Software", y presionar "Escáneres y dispositivos hápticos". Tras esto, bajo "Dispositivos hápticos" se presiona en "Ir a base de conocimientos", donde se debe seleccionar "Downloads", y posteriormente "OpenHaptics". Finalmente, se abre la ventana de selección de la versión de la librería a instalar, en la que se puede elegir la última versión 3.5.0, la cual se puede emplear con el entorno Unity también. Junto al instalador de la librería, se pueden descargar gratuitamente la API y la guía de instalación.

Una vez hecho esto, la librería se encuentra perfectamente instalada y se puede acceder a todos los documentos en "C:\OpenHaptics". Además, se pueden probar distintos ejemplos.

Sin embargo, para poder utilizarla, es necesario tener instalado el entorno de desarrollo Visual Studio. La librería funciona en la última versión de 2019. Este entorno se puede

descargar desde <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/> seleccionando la descarga de la última versión de Visual Studio Community, el cual es gratuito.

3. Encendido del dispositivo

Para comenzar a usar la aplicación de obtención de coordenadas tridimensionales, el dispositivo háptico Phantom Omni, debe estar conectado a su fuente de alimentación y por firewire al ordenador en el que se encuentre instalada la librería OpenHaptics® y el entorno de desarrollo Visual Studio.

Previamente, este dispositivo debe ser instalado usando los drivers correspondientes con su modelo, y pudiendo ser descargados de https://support.3dsystems.com/s/article/Haptic-Device-Drivers?language=en_US.

Se recomienda colocar el dispositivo háptico, de modo que su plano XY se disponga de forma paralela al plano XY del sistema del que se quieren obtener las coordenadas tridimensionales, de modo que los ejes XYZ coincidan con los del sistema a estudiar.

4. Obtención de coordenadas tridimensionales

Para comenzar a obtener las coordenadas tridimensionales del punto o puntos deseados, se ejecuta el ejecutable de la aplicación denominado "Coordenadas.exe".

Una vez realizado esto, se abre la ventana de la Figura A.1. En la que se muestra la interfaz de la aplicación, en la cual se observan una serie de opciones que realizan funciones distintas, según lo que el usuario desee en cada momento.

Una vez se dispone de esta ventana, únicamente se debe presionar el botón deseado en función del interés de ese momento.

Si se presiona el botón de "Obtener coordenadas". Se abre una ventana como la de la Figura A.2, en la que se muestran las instrucciones para la obtención de coordenadas.



Figura A.1. Consola al ejecutar Coordenadas.exe

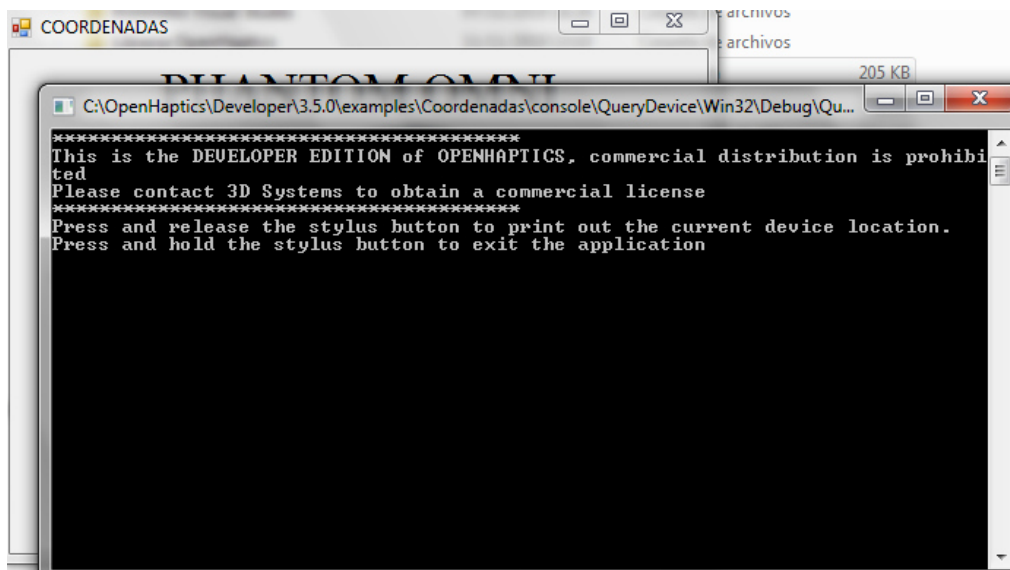


Figura A.2. Programa para la obtención de coordenadas.

En la ventana de la Figura A.2 se determina que para obtener coordenadas tridimensionales se debe presionar el botón gris del stylus del dispositivo háptico, de modo que cada vez que se pulse, se obtendrán las coordenadas de un punto concreto del espacio.

El botón del dispositivo háptico a pulsar es el que se observa rodeado por una circunferencia roja en la Figura A.3.



Figura A.3. Botón a pulsar para obtener coordenadas.

Todas las coordenadas tridimensionales obtenidas resultado de presionar el botón de la Figura A.3 se guardan en un archivo de texto (.txt), en la misma carpeta donde se encuentra la aplicación dentro del ordenador.

En el caso de querer dejar de usar el programa, se mantiene pulsado el botón gris representado en la Figura A.3 durante unos instantes hasta que la ventana se cierre, como se determina en la Figura A.2.

Otra de las funcionalidades de esta aplicación, y que se muestra en la Figura A.1 es el botón "Abrir archivo". Al presionar este botón, se abre el archivo de texto donde se encuentran almacenadas todas las coordenadas tridimensionales, con el fin de que el usuario pueda realizar cualquier comprobación. Para poder abrir este archivo, previamente se deben haber seleccionado algunos puntos con la opción de obtener coordenadas.

El último botón que proporciona una función de interés al usuario es "Borrar archivo", el cual permite eliminar el documento que contiene las coordenadas tridimensionales de los puntos seleccionados.

Finalmente, al presionar el botón "Exit" se cierra la aplicación completamente, dejando guardados todos los cambios realizados y puntos seleccionados.

Apéndice B

Protocolo de la aplicación del sistema de videogrametría

Este protocolo tiene como principal objetivo guiar al usuario de la aplicación de obtención de coordenadas tridimensionales haciendo uso del sistema de videogrametría por todos los pasos que este debe seguir de forma correcta para obtener resultados adecuados con el fin de obtener datos con rigor científico, y que se puedan emplear en trabajos e investigaciones posteriores.

1. Elementos necesarios

Para poner en funcionamiento la aplicación, es necesario contar con una serie de elementos imprescindibles, sin los cuales los resultados no serían válidos, o no se podría ejecutar. Estos se tratan de:

- **Dispositivos de captura de vídeos:** Se tratan de los elementos esenciales para realizar la captura de vídeos, de los cuales se obtendrán los frames que serán procesados. Este puede ser cámaras profesionales, como los dispositivos Digital Baumer, o bien, dispositivos disponibles a nivel de usuario, tales como teléfonos móviles.

- **Trípodes:** Elementos esenciales para fijar los dispositivos de captura de vídeos, con el fin de evitar que se produzcan variaciones o movimientos en estos que puedan afectar a los vídeos resultantes, además de dar una estabilidad mayor. Pueden ser de la marca MANFROTTO, o similares. Además, se recomienda que posean rótula, con el fin de poder ajustar la posición y orientación de los dispositivos de captura de forma sencilla.
- **Objetivos:** Se tratan de los elementos que permiten enfocar y dar profundidad de campo a los dispositivos de adquisición de vídeos, siempre y cuando estos se traten de cámaras. Si se emplean dispositivos móviles, estos no son necesarios.
- **Sistema a estudiar:** Se trata del sistema del que se quieren obtener las coordenadas tridimensionales de unos puntos de interés. Se pueden emplear modelos anatómicos, u otro tipo de elementos en función del interés del estudio.
- **Marcadores reflectantes:** Elementos esenciales para identificar los puntos de interés en el sistema a estudiar las coordenadas tridimensionales. Estos deben estar recubiertos de pintura reflectante a la longitud de onda de la luz negra o ultravioleta.
- **Sistema de iluminación:** Se trata del sistema compuesto por una serie de luces negras o ultravioleta, las cuales son esenciales para conseguir que los marcadores reflectantes se iluminen y resalten con respecto al resto de elementos, lo que facilita su identificación en el procesado posterior.
- **Calibrador:** Elemento para obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de los sistemas de captura de vídeos. Puede ser un tablero de cuadros blancos y negros.
- **MATLAB®:** Se trata de un sistema que ofrece un entorno de desarrollo integrado, el cual posee un lenguaje de programación propio. Es esencial para poder ejecutar la aplicación, ya que esta se encuentra desarrollada en este lenguaje de programación.

- **Software de captura de vídeos:** Se trata del software propio de los dispositivos de captura de vídeos empleados. En el caso de emplear las cámaras Digital Baumen, este se trata de "Baumer Camera Explorer". Si se emplean teléfonos móviles, este elemento no es necesario.
- **Ordenador:** Dispositivo para poder ejecutar la aplicación. Sobre este se encuentra instalado MATLAB®. Este debe tener un sistema operativo Windows 7 o posterior.

2. Preparación del entorno

Para poder ejecutar la aplicación de obtención de coordenadas tridimensionales del sistema de videogrametría se debe preparar un entorno determinado, el cual se corresponde con el mostrado en la Figura B.1.



Figura B.1. Entorno ajustado para la ejecución del sistema de videogrametría.

Los puntos de interés del sistema a estudiar se deben identificar mediante los marcadores reflectantes, de forma que estos no se puedan separar durante todo el estudio. Estos marcadores deben estar cubiertos por una pintura reflectante a la longitud de onda de la luz negra, es decir, de 315 a 400 nm. Además, esta cobertura debe ser homogénea, y evitando dejar zonas libres, las cuales no se reflejarán, y por

tanto, no serán detectadas por el algoritmo, generando una variación en los centroides de los marcadores.

El modelo anatómico o sistema a estudiar se debe colocar en una región donde se mantenga estable, evitando una movilidad no deseada durante la realización de las grabaciones.

Los trípodes deben ajustarse en las zonas cercanas a este sistema, de modo que posean la máxima estabilidad, y se evite cualquier desnivel que pueda afectar a la grabación. Sobre estos, se deben posicionar los dispositivos de adquisición de vídeos de forma fija, los cuales deben orientarse de modo que permitan la obtención de la máxima cantidad de información de los marcadores, evitando localizaciones cercanas o similares.

Por último, se debe encender el ordenador, y conectar los dispositivos de adquisición de vídeos a este, ejecutando su software de adquisición, siempre y cuando no se traten de teléfonos móviles.

3. Obtención de parámetros extrínsecos e intrínsecos

Antes de comenzar a realizar la captura de vídeos se deben obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos en función de la posición y orientación de los sistemas de captura de vídeos.

Estos deben estar fijos en los trípodes, y perfectamente estables. Además, el entorno no debe estar oscurecido, se recomienda emplear luz natural.

Se deben obtener de 20 a 30 fotografías con ambos dispositivos de captura de vídeos. En estas fotografías se debe observar el sistema a estudiar, y un calibrador, el cual puede ser un tablero de cuadros blancos y negros. Se debe variar la localización de este último elemento en cada una de las fotografías. Además, estas deben realizarse de forma simultánea en ambos dispositivos de captura de vídeos, tal y como se muestra en la Figura B.2.

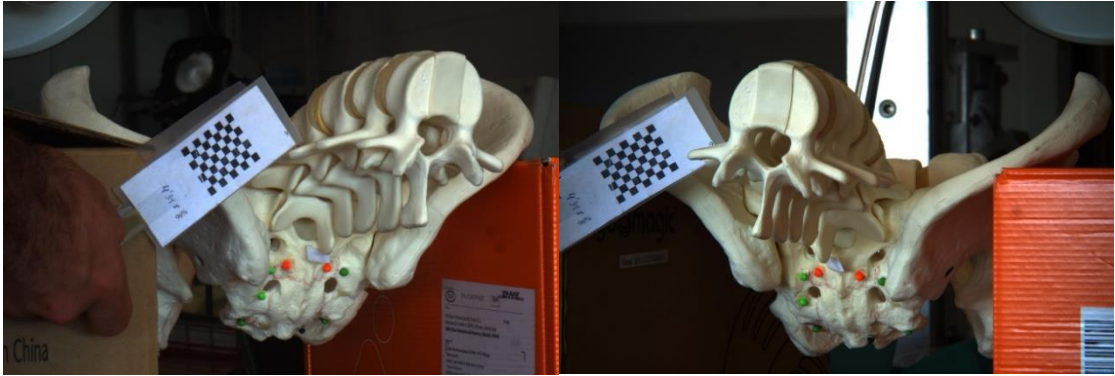


Figura B.2. Modo de obtención de las imágenes para conseguir los parámetros extrínsecos e intrínsecos.

Una vez obtenidas, se utiliza "Stereo Camera Calibrator", una toolbox de MATLAB®, a la cual se le suministran todas las imágenes y se obtienen los parámetros de cada uno de los dispositivos, los cuales se deben guardar para usarlos posteriormente.

4. Captura de vídeos

Para comenzar la captura de vídeos por ambos dispositivos se debe encender el sistema de iluminación de luz negra.

Este sistema de iluminación debe colocarse de forma cercana al modelo a estudiar, de modo que ilumine completamente todos los marcadores, evitando dejar zonas libres y que no se reflejen de forma adecuada. Esta luz debe afectar de forma uniforme en todas las direcciones a los marcadores. Además, se debe reducir la luz natural del entorno, obteniendo un ambiente oscurecido.

En el ordenador se debe ejecutar el software de captura de vídeos de los dispositivos de captura de datos, a la vez que se activa el trigger para sincronizarlos en el caso de que estos no sean dispositivos móviles.

Una vez ajustado esto, se deben comenzar las grabaciones, por lo que se debe realizar el movimiento a estudiar por parte del sistema o modelo anatómico en el que se encuentran los marcadores reflectantes.

Tras la realización de este último paso, ya se poseen los vídeos sincronizados de ambos dispositivos de captura de datos.

5. Obtención de coordenadas tridimensionales

Una vez obtenidos los vídeos de ambos dispositivos, se debe ejecutar la aplicación en MATLAB®. Hay que tener en cuenta que antes de comenzar este proceso, se deben contar con los parámetros extrínsecos e intrínsecos en el mismo WorkSpace.

En esta ejecución se deben seleccionar las grabaciones correspondientes a ambos sistemas de captura de datos, además de introducir el número de marcadores empleados para identificar los puntos de interés, así como el diámetro de estos.

Una vez definidos estos parámetros, el software devuelve las coordenadas tridimensionales de cada uno de los marcadores en cada frame de los vídeos sincronizados. Además, estas coordenadas las almacena en un documento de texto para su uso posterior.

Apéndice C

Código de MATLAB de la aplicación de seguimiento del sistema de videogrametría

```
function [centers, radii] = Tracking(Imagen, n_markers, centros)
%Track markers using the centers in the previous frame

%OUTPUT ARGUMENTS
% centers: markers centers in the current frame
% radii: markers radios in the current frame
%INPUT ARGUMENTS
% Imagen: frame to process
% n_markers: number of markers in the frames
% centros: marker centers in the previous frame

for n=1:n_markers
    i=centros(n,2);
```

```

j=centros(n,1);
p = impixel(Imagen, j, i);
ilnicio = i;
jlnicio = j;

%Search white zone
while(p==0)
    for f=i-35:i+35
        for c=j-35:j+35
            p = impixel(Imagen, c, f);
            ilnicio = f;
            jlnicio = c;
            if(p>0)
                break
            end
        end
    end
    if(p>0)
        break
    end
end
if(p==0)
    break
end
end

p = impixel(Imagen, jlnicio, ilnicio);
iBusca = ilnicio;
jBusca = jlnicio;

%Compute minimum x
while (p(1,1) >= 200)
    jBusca = jBusca-1;

```

```

    p = impixel(Imagen, jBusca, iBusca);
end
jmin = jBusca + 1;
p = impixel(Imagen, jmin, iBusca);

while (p(1,1) >= 200)
    if(impixel(Imagen, jmin-1, iBusca+1) >= 200)
        iBusca = iBusca+1;
        jmin = jmin-1;
    elseif(impixel(Imagen, jmin-1, iBusca-1) >= 200)
        iBusca = iBusca-1;
        jmin = jmin-1;
    else
        break
    end
    p = impixel(Imagen, jmin, iBusca);
end

p = impixel(Imagen, jInicio, iInicio);
iBusca = iInicio;
jBusca = jInicio;

%Compute maximum x
while (p(1,1) >= 200)
    jBusca = jBusca+1;
    p = impixel(Imagen, jBusca, iBusca);
end

jmax = jBusca-1;
p = impixel(Imagen, jmax, iBusca);

while (p(1,1) >= 200)

```

```

if(impixel(Imagen, jmax+1, iBusca+1)>= 200)
    iBusca = iBusca+1;
    jmax = jmax+1;
elseif(impixel(Imagen, jmax+1, iBusca-1)>= 200)
    iBusca = iBusca-1;
    jmax = jmax+1;
else
    break
end
p = impixel(Imagen, jmax, iBusca);
end

```

```

p = impixel(Imagen, jInicio, iInicio);
iBusca = iInicio;
jBusca = jInicio;

```

%Compute minimum y

```

while (p(1,1) >= 200)
    iBusca = iBusca-1;
    p = impixel(Imagen, jBusca, iBusca);
end

```

```

imin = iBusca + 1;
p = impixel(Imagen, jBusca, imin);

```

```

while (p(1,1) >= 200)
    if(impixel(Imagen, jBusca-1, imin-1)>= 200)
        imin = imin-1;
        jBusca = jBusca-1;
    elseif(impixel(Imagen, jBusca+1, imin-1)>= 200)
        imin = imin-1;
        jBusca = jBusca+1;
    end
end

```



```

else
    break
end

p = impixel(Imagen, jBusca, imin);
end

p = impixel(Imagen, jInicio, ilnicio);
iBusca = ilnicio;
jBusca = jInicio;

%Compute maximum y
while (p(1,1) >= 200)
    iBusca = iBusca+1;
    p = impixel(Imagen, jBusca, iBusca);
end
imax = iBusca - 1;
p = impixel(Imagen, jBusca, imax);

while (p(1,1) >= 200)
    if(impixel(Imagen, jBusca-1, imax+1)>=200)
        imax = imax+1;
        jBusca = jBusca-1;
    elseif(impixel(Imagen, jBusca+1, imax+1)>=200)
        imax = imax+1;
        jBusca = jBusca+1;
    else
        break
    end
    p = impixel(Imagen, jBusca, imax);
end

%Compute the centers and radius

```

```
    icentro = (imax + imin)/2;
    jcentro = (jmax + jmin)/2;
    diametro = abs(jmax-jmin);
    radio = abs(diametro/2);

    centroNuevo(n,1) = jcentro;
    centroNuevo(n,2) = icentro;

    radioNuevo(n,1) = radio;
end
centers = centroNuevo;
radii = radioNuevo;
end
```

Apéndice D

Código de MATLAB del sistema de sincronización de dispositivos móviles

```
function [Frames] = SincronizaFrames(Video)

%Find the start and end sound in a videom and get the frames corresponding to the
period between them.

%OUTPUT ARGUMENTS
% Frames: frames of the interest section in the video

%INPUT ARGUMENTS
% Video: video to process

%% Obtain video data
[a1, F1] = audioread(Video);
vid1 = audioinfo(Video);

%Show the sounds during time
t1 = 0:(1/F1):(vid1.Duration);
t1 = t1(1:length(a1));
figure
```

```

plot(t1,a1);
xlabel('Time');
ylabel('Audio Signal');

%% FIND A START AND END POINT
clzq = a1(:,1);

%Start sound
tiempolnicial = 0;
for i=1:length(a1)
    if(clzq(i)<-0.1 || clzq(i)>0.1)
        tiempolnicial = t1(i);
        break
    end
end

%Initial sound video duration
FinSonIn = 0;
for j=i:length(a1)
    if(clzq(j)<-0.001 || clzq(j)>0.001)
        FinSonIn = t1(j);
    elseif((clzq(j-1)>-0.0001 && clzq(j-1)<0.0001) && ((clzq(j+1)>-0.0001 &&
clzq(j+1)<0.0001)))
        break
    end
end

%Final sound
for k=j:length(a1)
    if(clzq(k)<-0.1 || clzq(k)>0.1)
        tiempoFinal = t1(k);
        break
    end
end

```

```

    end
end

%% OBTAIN THE FRAMES BETWEEN THE SOUNDS

Video1 = VideoReader(Video);
Video1.currentTime = tiempoInicial;
s1 = struct('cdata',zeros(Video1.Height,Video1.Width,3,'uint8'));

b1 = 1;
while Video1.CurrentTime <= tiempoFinal
    s1(b1).cdata = readFrame(Video1);
    b1 = b1+1;
end

Frames = s1;

end

```


Apéndice E

Código de MATLAB del sistema de validación de la precisión en la detección de los marcadores

%Desarrollado por Alejandro Peña Trabalón. Ingeniería de la Salud.

```
directorio = uigetdir('','Select the images directory');  
lee_archivos = dir(strcat(directorio, '/*.jpg'));  
archivo = lee_archivos(1).name;  
Imagen1 = imread(strcat(directorio,filesep,archivo));  
d0 = measureDiameterCircle('',Imagen1);  
D_marker = d0;  
r_marker = D_marker/2;  
  
n_markers=input('Number of markers in the video: ');  
CircularityTol=input('Circularity: ');
```

```

MarkerCenters=NaN*ones(n_markers,2,length(lee_archivos));
MarkerRadios=NaN*ones(n_markers,1,length(lee_archivos));

i = 1;
q = 0.1;

%% SELECT THE COLOR OF THE MARKERS
color_to_track='red';

%HSV thresholds for the selected color
if strcmp(color_to_track,'red')
    hueThresholdLow = 0.0;
    hueThresholdHigh = 0.25;
    saturationThresholdLow = 0.60;
    saturationThresholdHigh = 1.00;
    valueThresholdLow = 0.92
    valueThresholdHigh = 1.00
end
for k = 1:length(lee_archivos)

    archivo = lee_archivos(k).name;
    I = imread(strcat(directorio,filesep,archivo));
    % Convert RGB image to HSV
    hsvImage = rgb2hsv(I);
    % Extract out the H, S, and V images individually
    hImage = hsvImage(:,:,1);
    sImage = hsvImage(:,:,2);
    vImage = hsvImage(:,:,3);
    % Apply each color band's particular thresholds to the color band
    if hueThresholdLow < hueThresholdHigh
        hueMask = (hImage >= hueThresholdLow) & (hImage <= hueThresholdHigh);
    else
        hueMask = (hImage <= hueThresholdHigh) | (hImage >= hueThresholdLow);
    end
    saturationMask = (sImage >= saturationThresholdLow) & (sImage <=

```



```

saturationThresholdHigh);
    valueMask = (vImage >= valueThresholdLow) & (vImage <=
valueThresholdHigh);
    % Combine the masks to find where all 3 are "true."
    coloredObjectsMask = uint8(hueMask & saturationMask);
    % Get rid of small or big objects
    smallestAcceptableArea = 50;.
    coloredObjectsMask = uint8(bwareaopen(coloredObjectsMask,
smallestAcceptableArea
    % Smooth the border using a morphological closing operation, imclose().
    structuringElement = strel('disk', 4);
    coloredObjectsMask = imclose(coloredObjectsMask, structuringElement);
    % Fill in any holes in the regions, since they are most likely red also.
    coloredObjectsMask = imfill(logical(coloredObjectsMask), 'holes');.
    coloredObjectsMask = cast(coloredObjectsMask, 'like', I);

    % Use the colored object mask to mask out the colored-only portions of the rgb
image.
    maskedImageR = coloredObjectsMask .* I(:, :, 1);
    maskedImageG = coloredObjectsMask .* I(:, :, 2);
    maskedImageB = coloredObjectsMask .* I(:, :, 3);

%Create the masked out frame and the labeled matrix

    if strcmp(color_to_track, 'red')
        maskedImage=maskedImageR;
        clear aux; aux='Masked Image R';
    end

%Eliminate pixels with lower values of the selected color
    ColorThreshold=150;
    Colormask=(maskedImage>=ColorThreshold);
    Colormask=uint8(Colormask);
    maskedImage=Colormask.*maskedImage;

```

```

%Closing operation using structuring element
    maskedImage = imdilate(maskedImage, structuringElement);
    maskedImage = imerode(maskedImage, structuringElement);

%% RADIUS RANGE VARIATION
    i = i+1;
    rmin = round((1-i*q)*r_marker);
    if rmin<=2
        rmin=2;
    end
    rmax = round((1+i*q)*r_marker);

%% FIND CIRCLES
    [centers,radii,metric] = imfindcircles(maskedImage, [rmin rmax], 'ObjectPolarity',
    'bright', 'Sensitivity', CircularityTol);

%% LIST WITH CENTERS AND RADIUS CREATION
    n = n_markers+1;
    centers(n:end,:) = [];
    radii(n:end) = [];
    metric(n:end) = [];

%% SHOW MARKERS IN THE IMAGES
    figure, imshow(I)
    viscircles(centers,radii,'Color','b');
    hold on
    plot(centers(:,1),centers(:,2),'+','Color','r','MarkerSize',15)
    hold off
    disp(k);

%% SAVE THE MARKERS IN THE LIST
    n_centers=size(centers,1);
    MarkerCenters(1:n_centers,:,k)=centers;
    MarkerRadios(1:n_centers,:,k)=radii;

end

```

Apéndice F

Presupuesto del sistema de iluminación

Tabla F.1. Presupuesto del sistema de iluminación de luz negra desarrollado.

ELEMENTO	MATERIAL	PRECIO POR UNIDAD	UNIDADES	PRECIO TOTAL
Interruptor de balancín	Nylon y latón	1,471 €	1	1,471 €
Tornillo M10x1.5 de 70mm de longitud	Acero inoxidable	0,446 €	2	0,892 €
Tornillo M10x1.5 de 50mm de longitud	Acero inoxidable	2,305 €	4	9,220 €
Tuerca mariposa M10x1.5	Acero galvanizado	0,339 €	2	0,678 €
Tornillo doble rosca macho de 3/8 y 1/4	Acero al carbono	3,560 €	1	3,560 €

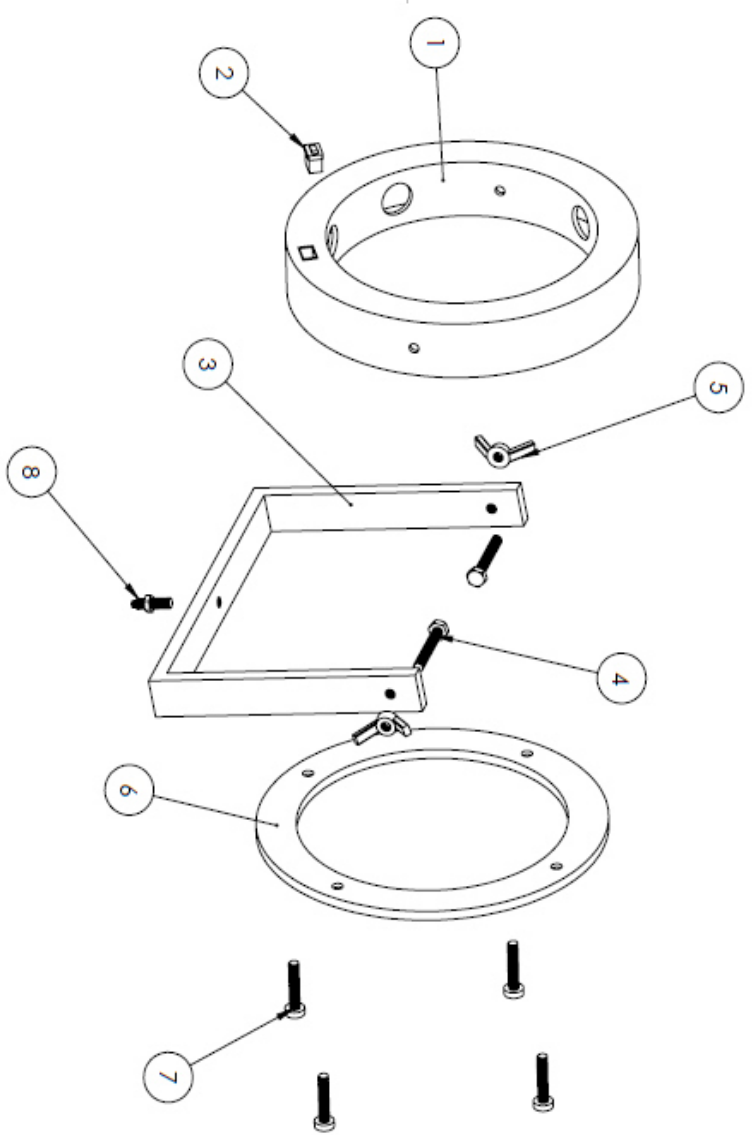
pulgadas de diámetro				
Bombillas de luz negra de bajo consumo 15W con casquillo E27	Cristal	7,500 €	6	45,000 €
Portalámparas para casquillos E27	Plástico	0,990 €	6	5,940€
Cables con clavija	Plástico y cobre	3,480 €	1	3,480 €
TOTAL				70,241 €

Apéndice G

Plano de explosión del sistema de iluminación

En la siguiente página se muestra el plano del sistema de iluminación de luz negra diseñado en este proyecto.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Arco delantero	Arco hueco de aluminio	1
2	Interruptor	Interruptor de balancín, ON-Off con carcasa de nylon y patillas de latón plateado	1
3	Brazo móvil	Brazo de aluminio para mover el arco	1
4	Tornillo M10 70mm	Tornillo M10 de 10 mm de diámetro y 70 mm de longitud	2
5	Tuerca Mariposa	Tuerca mariposa M10	2
6	Arco trasero	Arco de aluminio	1
7	Tornillo M10 50mm	Tornillo M10 de 10 mm de diámetro y 50 mm de longitud	4
8	Adaptador 3/8 doble	Tornillo doble de 3/8 y 1/4 pulgadas de diámetro	1



TÍTULO DEL PROYECTO		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		DENOMINACIÓN DEL PLANO	
Diseño de un arco de iluminación				Arco de Luces	
FECHA	JUSTO 2020	FIRMA		N.º DE PLANO	1
NOMBRE				LOCALIZACIÓN	A.3
CLIENTE	UNIVERSIDAD DE MÁLAGA				
PROYECTISTA	UNIVERSIDAD DE MÁLAGA				
DESBINANTE	ALBAÑERO RESA TRAJALÓN	ESCALA: 1:5		UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| uma.es

E.T.S de Ingeniería Informática
Bulevar Louis Pasteur, 35
Campus de Teatinos
29071 Málaga

E.T.S. DE INGENIERÍA INFORMÁTICA