

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Visualización de parámetros de movimiento en deportistas de halterofilia
utilizando arreglos de cámaras infrarrojas.

TECH-351

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero/a en Ciencias de la Computación

Presentado por:

David Alejandro Alarcón Galeas

Emily Ashley Cordero Sabando

Guayaquil - Ecuador

Año:

2023 - 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis amados padres, Roberto y Nidia, porque todos mis logros son por y para ellos. A Gloria Vélez, mi abuelita, que siente mucho orgullo cuando sus nietos se convierten en profesionales.

Emily Ashley Cordero Sabando

Dedico este proyecto a mis padres, Javier y Andrea , porque han sido mi pilar y motivación para salir adelante. A mis seres queridos, familia y amigos que me han apoyado a lo largo mi carrera.

David Alejandro Alarcón Galeas

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a nuestro tutor Federico Domínguez y al doctor Daniel Ochoa, quienes nos han brindado sus conocimientos y recomendaciones a lo largo de la elaboración de este proyecto. Al Ing. Galo Tatés, por su apoyo constante y disposición para enseñarnos sobre el manejo de las cámaras y ayudarnos cuando se presentaban inconvenientes técnicos.

Declaración expresa

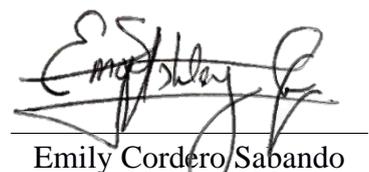
Nosotros David Alejandro Alarcón Galeas y Emily Ashley Cordero Sabando, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 16 de febrero del 2024.


David Alarcón Galeas


Emily Cordero Sabando

Evaluadores

.....
Ronald Criollo

Profesor de la materia

.....
Federico Domínguez

Profesor tutor

Resumen

En el competitivo mundo del deporte de alto rendimiento, la halterofilia demanda precisión y perfección en cada movimiento, ya que la diferencia entre el éxito y el fracaso puede ser mínima. La técnica es crucial, no solo para el rendimiento óptimo, sino también para prevenir lesiones graves. Este estudio se enfoca en aprovechar la tecnología de cámaras infrarrojas, específicamente las cámaras OptiTrack en el Centro de Tecnologías de Información (CTI) en la ESPOL, para capturar y analizar el movimiento de los atletas de halterofilia.

Este trabajo, busca no solo desarrollar un programa de escritorio sino también abordar desafíos específicos, como la determinación del error en la medición de la posición de los marcadores y el cálculo de ángulos y vectores de desplazamiento. Este enfoque tiene la finalidad de perfeccionar la técnica individual e influir positivamente, a futuro, en otros deportes, contribuyendo al éxito deportivo a nivel nacional.

Palabras clave: OptiTrack, Motive, medición de error, MAE.

Contenido

Evaluadores.....	5
Capítulo 1.....	11
1.1 Introducción.....	12
1.2 Descripción del problema.....	12
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	13
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
1.5 Marco teórico.....	14
1.5.1 <i>Biomecánica</i>	14
1.5.2 <i>Optical Motion Capture (OMC)</i>	14
1.5.3 <i>OptiTrack</i>	15
1.5.4 <i>Archivo BVH</i>	16
1.5.5 <i>Soluciones existentes</i>	16
Capítulo 2.....	19
2.1 Metodología.....	20
2.1.1 <i>Análisis</i>	20
2.2 Diseño de la solución.....	22
2.2.1 <i>Prototipo</i>	22
2.2.2 <i>Calibración del sistema</i>	24
2.2.3 <i>Cálculo del error del sistema</i>	24
2.2.4 <i>Interpolación</i>	29
2.2.5 <i>Cálculo de parámetros</i>	30
3.2.1 <i>Parámetros Calculados</i>	32
Capítulo 3.....	34
3.1 Plan de Implementación.....	35
3.3 Pruebas.....	37
3.3.1 <i>Cálculo de parámetros</i>	38
3.4 Resultados.....	41

3.4.2.	<i>Interpolación de Kriging</i>	47
3.4.3.	<i>Extracción de datos BCH y visualización en 3D</i>	50
3.4	Análisis De Costos	53
Capítulo 4	54
4.1	Conclusiones y recomendaciones	55
4.1.1	<i>Conclusiones</i>	55
4.1.2	<i>Recomendaciones</i>	55
Referencias	56

Índice de figuras

Figura 1. <i>Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario</i>	22
Figura 2. <i>Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario</i>	23
Figura 3. <i>Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario</i>	23
Figura 4. <i>Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario</i>	24
Figura 5. <i>Posición de los ejes</i>	25
Figura 6. <i>Arreglo de cámaras OptiTrack en el CTI</i>	25
Figura 7. <i>Ubicación de los marcadores</i>	26
Figura 8. <i>Interfaz de usuario gráfica</i>	38
Figura 9. <i>Interfaz de usuario gráfica</i>	39
Figura 10. <i>Interfaz de usuario gráfica</i>	39
Figura 11. <i>Interfaz de usuario gráfica</i>	40
Figura 12. <i>Interfaz de usuario gráfica</i>	40
Figura 13. <i>Gráfico tridimensional de los marcadores con su valor de error</i>	43
Figura 14 y 15. <i>Gráfico tridimensional de los marcadores con su valor de error (excepto el marcador cd4-punto2)</i>	44
Figura 16. <i>Marcadores reconocidos a nivel del suelo</i>	46
Figura 17. <i>Marcadores reconocidos a 2.15m de altura</i>	47
Figura 18. <i>Video mp4 del cuerpo del atleta</i>	52

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Coordenadas de los marcadores</i>	27
Tabla 2. <i>Alturas de ubicación de los marcadores</i>	28
Tabla 3. <i>Desviación estándar de los marcadores</i>	41
Tabla 4. Valor del MAE	42
Tabla 5. <i>Gráficos de mapa de error de cada altura analizada.</i>	48
Tabla 6. <i>Análisis de Costos</i>	53

Capítulo 1

1.1 Introducción

En el mundo del deporte de alto rendimiento, la búsqueda de la excelencia nunca cesa. La halterofilia es una disciplina en la cual la diferencia entre ganar y perder una medalla puede ser extremadamente estrecha. Cada detalle, desde la postura inicial hasta el desplazamiento de los brazos, la velocidad y la aceleración, los ángulos de las extremidades, y la precisión de cada movimiento, influye de manera significativa en el resultado final. Sin embargo, la dificultad radica en la capacidad de cuantificar, medir y analizar estos parámetros de forma precisa.

La técnica es una clave fundamental para el éxito en la halterofilia. Una mala técnica puede llevar a lesiones graves y, en última instancia, al fracaso en competencias de alto nivel.

En esta búsqueda de la mejora, la tecnología de cámaras infrarrojas emerge como una herramienta fundamental. La disponibilidad de cámaras OptiTrack en el Centro de Tecnologías de Información (CTI) en la ESPOL, ofrece una oportunidad única para llevar a cabo este estudio. Este proyecto se basa en su uso para capturar el movimiento de los atletas, procesar estos datos y analizar parámetros cruciales, considerando los errores del software Motive, al obtener los datos. La visión de las cámaras infrarrojas se complementa con un software de análisis que traduce estos datos en información valiosa para los atletas y sus entrenadores.

1.2 Descripción del problema

En la actualidad, los atletas de halterofilia de alto rendimiento buscan constantemente mejorar su técnica y rendimiento, lo que puede marcar la diferencia entre el éxito y la derrota en competencias de élite. A medida que los estándares de competición continúan elevándose y la diferencia entre los mejores atletas se vuelve cada vez más estrecha, la importancia de encontrar ventajas competitivas a través de la tecnología y el análisis de datos se vuelve más evidente, por lo que esta necesidad de mejora es actual y apremiante.

La dificultad reside en la precisión y accesibilidad para calcular y visualizar parámetros de movimiento, como ángulos en ciertas posturas, desplazamiento, velocidad y aceleración. La solución propuesta se basa en la utilización de cámaras infrarrojas para capturar y analizar los movimientos de los atletas, permitiendo una observación precisa y una medición detallada de dichos parámetros de movimiento. Sin embargo, esta solución enfrenta restricciones en cuanto a costos tecnológicos, precisión y calibración. Se debe calcular el error del sistema de medición de coordenadas de los marcadores y esto debe hacerse de forma experimental.

1.3 Justificación del problema

La ejecución de una buena técnica en los deportes es esencial para el rendimiento, la seguridad, la consistencia y el desarrollo a largo plazo de un deportista. En deportistas de halterofilia, eso puede resultar en un mejor rendimiento, ya que se aprovechan al máximo la fuerza y la resistencia, lo que puede llevar a un mejor resultado en la competición.

Dada la situación, surge la necesidad de implementar una solución automatizada que permita visualizar con precisión parámetros críticos como la postura, la coordinación y la velocidad durante el levantamiento de pesas.

La tecnología infrarroja aplicada a la visualización de la actividad física no solo tiene el potencial de mejorar el entrenamiento en halterofilia, sino también se puede usar en otros deportes y eventualmente incrementar el número de éxitos deportivos del país.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un programa de escritorio que permita procesar y visualizar parámetros como velocidad, aceleración y desplazamiento en deportistas de halterofilia utilizando el software Motive, el cual emplea arreglos de cámaras infrarrojas para capturar movimientos en 3D con marcadores, con la finalidad de mejorar el rendimiento deportivo.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Determinar el error en la medición de la posición de los marcadores utilizados para capturar el movimiento en el software Motive, mediante la implementación de técnicas de calibración.
2. Calcular los ángulos y vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración entre los marcadores en el espacio tridimensional.
3. Desarrollar una plataforma de visualización que presente de manera efectiva la información de los parámetros obtenidos de la actividad física, junto con las estadísticas de movimientos.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Biomecánica

La biomecánica es una disciplina crucial en el estudio de la mecánica del cuerpo humano y su movimiento. Esta disciplina se centra en la aplicación de principios de la física y la ingeniería para analizar cómo funcionan las estructuras musculoesqueléticas y cómo se generan y transmiten las fuerzas durante la actividad física [1]. En el contexto del deporte, especialmente en disciplinas como la halterofilia, la biomecánica desempeña un papel fundamental. Proporciona una comprensión profunda de cómo los atletas aplican fuerza, controlan la postura y la técnica, y optimizan el rendimiento. La biomecánica no solo permite evaluar la eficacia del movimiento, sino que también es esencial para la prevención de lesiones, la rehabilitación y la optimización de la práctica deportiva.

1.5.2 Optical Motion Capture (OMC)

La Optical Motion Capture (OMC), o Captura Óptica de Movimiento en español, es una avanzada tecnología utilizada para registrar y seguir con precisión el movimiento de objetos o seres humanos en entornos tridimensionales. Este sistema se basa en el uso de cámaras ópticas especializadas, marcadores y software de análisis de movimiento [2].

En un sistema de OMC, los sujetos u objetos a capturar están equipados con marcadores reflectantes, generalmente esferas o puntos, que reflejan la luz infrarroja emitida por las cámaras. Varios marcadores en las cámaras registran la posición tridimensional de estos marcadores en tiempo real. El software de OMC procesa estos datos para recrear con precisión el movimiento en un modelo tridimensional. Esta técnica se utiliza en diversas aplicaciones, como la industria del entretenimiento para la animación de personajes en películas y videojuegos, en la investigación científica para el estudio del movimiento humano y en la medicina para el seguimiento de la rehabilitación y la biomecánica.

1.5.3 OptiTrack

OptiTrack es una reconocida marca que se especializa en sistemas de captura de movimiento, y sus cámaras infrarrojas se utilizan comúnmente en sistemas de seguimiento y captura de movimiento de alta precisión. Las cámaras OptiTrack utilizan tecnología infrarroja para rastrear los marcadores reflectantes y realizar un seguimiento tridimensional extremadamente preciso de objetos o sujetos en tiempo real [3].

OptiTrack proporciona herramientas y software que facilitan la sincronización y calibración de múltiples cámaras, lo que es esencial para sistemas de captura de movimiento en los que se utilizan varias cámaras en conjunto.

El software Motive de OptiTrack es una herramienta esencial en sistemas de captura de movimiento basados en cámaras OptiTrack. Permite la calibración precisa de cámaras, el seguimiento en tiempo real de marcadores reflectantes y el procesamiento de datos de movimiento en 3D. Motive es conocido por su capacidad de exportar datos y su integración con otros programas de animación y diseño 3D, lo que lo convierte en una elección popular en industrias como la producción de películas y videojuegos. Algunos de los formatos de archivo más comunes que Motive puede generar incluyen: csv, c3d, bvh, fbx y txt. En este proyecto, se utilizó el software Motive en su versión 1.5.0.

1.5.4 Archivo BVH

Los archivos BVH (BioVision Hierarchy) son un formato de archivo utilizado para describir la información de la cinemática de un esqueleto tridimensional. Estos archivos son comúnmente utilizados en animación por computadora y en la captura de movimiento para representar la estructura de huesos y las posiciones de las articulaciones en un modelo tridimensional. Los archivos BVH contienen información sobre la jerarquía del esqueleto, así como los ángulos y posiciones de cada articulación en diferentes fotogramas a lo largo del tiempo.

1.5.5 Soluciones existentes

1.5.5.1 3D Studio Max:

Es una aplicación de modelado y animación 3D desarrollada por Autodesk. Fue la segunda versión de 3D Studio Max [4]. Incluía una serie de nuevas características y mejoras en comparación con la versión anterior. Estas características incluían:

- Un nuevo motor de renderizado, RenderMan, que proporcionaba una mayor calidad de imagen.
- Un nuevo sistema de animación, Character Studio, que facilitaba la creación de animaciones de personajes.
- Un nuevo conjunto de herramientas de modelado, que incluían herramientas para crear formas primitivas, superficies y objetos compuestos.

3D Studio Max versión 2.5 fue utilizado por una amplia gama de usuarios, incluidos artistas, diseñadores, ingenieros y arquitectos. Fue utilizado para crear una variedad de contenido 3D, incluyendo películas, videojuegos, efectos especiales y modelos arquitectónicos. Algunos de los aspectos más destacados de 3D Studio Max incluyen:

- **RenderMan:** RenderMan era un motor de renderizado basado en la física que utilizaba un algoritmo de trazado de rayos para generar imágenes. RenderMan era capaz de producir imágenes fotorrealistas y era utilizado por muchos estudios de efectos especiales para crear imágenes para películas.
- **Character Studio:** Character Studio era un sistema de animación basado en huesos que facilitaba la creación de animaciones de personajes. Character Studio incluía una biblioteca de animaciones predefinidas que podían ser utilizadas para crear animaciones complejas.
- **Nuevas herramientas de modelado:** Las nuevas herramientas de modelado de 3D Studio Max versión 2.5 incluían herramientas para crear formas primitivas, superficies y objetos compuestos. Las herramientas de modelado facilitaban la creación de formas complejas y permitían a los usuarios crear modelos 3D más detallados.

1.5.5.2 Blender

Blender es un software de modelado, animación, renderización, composición y edición de vídeo 3D gratuito y de código abierto. Es un software potente y versátil que se puede utilizar para crear una variedad de contenido 3D, incluyendo películas, videojuegos, efectos especiales, modelos arquitectónicos y arte. Se lanzó por primera vez en 1995 y ha sido desarrollado por una comunidad de voluntarios desde entonces. El software es de código abierto, lo que significa que cualquiera puede ver el código fuente y contribuir al desarrollo [5].

Blender es una herramienta poderosa para una amplia gama de usuarios, desde principiantes hasta profesionales. El software ofrece una amplia gama de características y funcionalidades, incluyendo:

- **Modelado:** Blender incluye una amplia gama de herramientas para crear modelos 3D, desde formas primitivas hasta modelos complejos.

- Animación: Blender incluye un sistema de animación completo que permite a los usuarios crear animaciones de personajes y objetos.
- Renderización: Blender incluye un motor de renderizado que permite a los usuarios crear imágenes fotorrealistas.
- Composición: Blender incluye un editor de composición que permite a los usuarios crear composiciones de vídeo 3D.
- Edición de vídeo: Blender incluye un editor de vídeo que permite a los usuarios editar vídeos 3D.

Capítulo 2

2.1 Metodología

El proceso de diseño se llevó a cabo en las siguientes etapas:

2.1.1 Análisis

En la etapa de análisis, se identificaron los requisitos del sistema. Los requisitos se clasificaron en funcionales y no funcionales.

2.1.1.1 Requerimientos funcionales

- El sistema debe cargar, filtrar y procesar los archivos CSV provenientes del software Motive.
- El sistema debe ser capaz de calcular y mostrar el error en la posición de los marcadores utilizados para capturar el movimiento.
- El sistema debe ser capaz de calcular los parámetros de movimiento de los atletas, tales como ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones.
- El sistema debe mostrar los movimientos de los atletas y los parámetros de movimiento en un entorno 3D.

2.1.1.2 Requerimientos no funcionales

- El sistema debe ser fácil de usar por parte de los atletas y sus entrenadores.

2.1.1.3 Alcance y limitaciones de la solución

El alcance de la solución es el siguiente:

- Se determinará experimentalmente la precisión de las cámaras del sistema Motive, el error de los marcadores estáticos, y el error de propagación de los parámetros encontrados.
- El sistema calculará los parámetros de movimiento de los atletas, tales como ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones.
- El sistema mostrará los movimientos de los atletas y los parámetros de movimiento en un entorno 3D.

Las limitaciones de la solución son las siguientes:

- El sistema no implementa ningún mecanismo de corrección de error en las posiciones del atleta.
- El sistema no toma en cuenta las características físicas del atleta.
- El sistema no mide la posición de la barra.
- El sistema no mostrará los parámetros del atleta en tiempo real.

2.1.1.4 Riesgos y beneficios de la solución

Los riesgos de la solución son los siguientes:

- La interfaz del sistema puede ser demasiado compleja de usar.

Los beneficios de la solución son los siguientes:

- El sistema ayudará a los atletas a mejorar su técnica de halterofilia.

- El sistema ayudará a los entrenadores a evaluar el rendimiento de los atletas.

2.2 Diseño de la solución

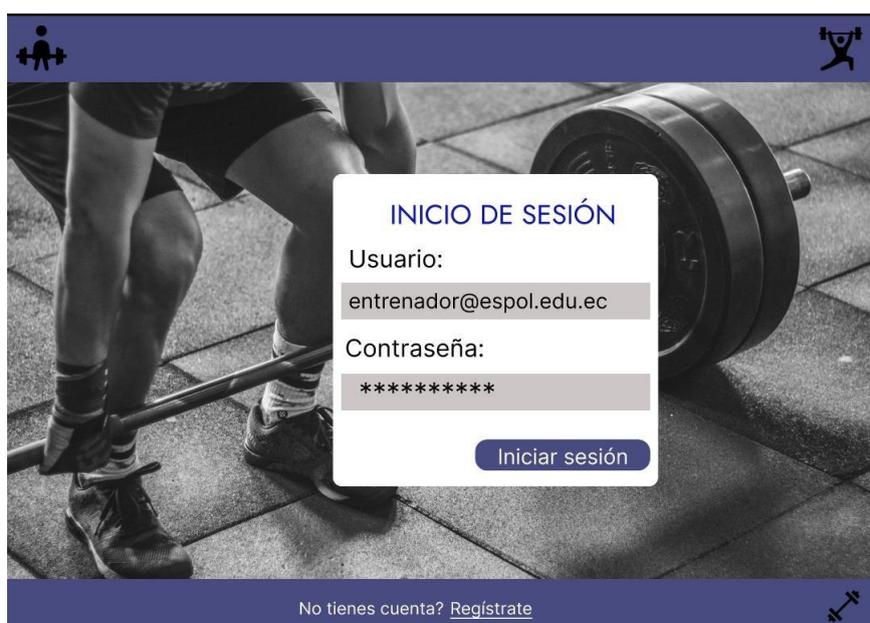
2.2.1 Prototipo

En esta etapa, se desarrolló un prototipo del sistema para evaluar su viabilidad. El prototipo se desarrolló utilizando la herramienta de prototipado “Figma”. A continuación, se detalla mediante imágenes el prototipo propuesto para el desarrollo del software:

El programa cuenta con inicio de sesión en el que principalmente se le sugiere al entrenador y/o usuario que cargue un archivo para empezar o que abra un archivo existente el cual ya ha procesado antes, luego el programa lee el archivo, limpia los datos y calcula los parámetros para posteriormente mostrarlos en pantalla de la forma en que se muestra en la ilustración 4.

Figura 1.

Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario



Nota. Pantalla de inicio de sesión

Figura 2.

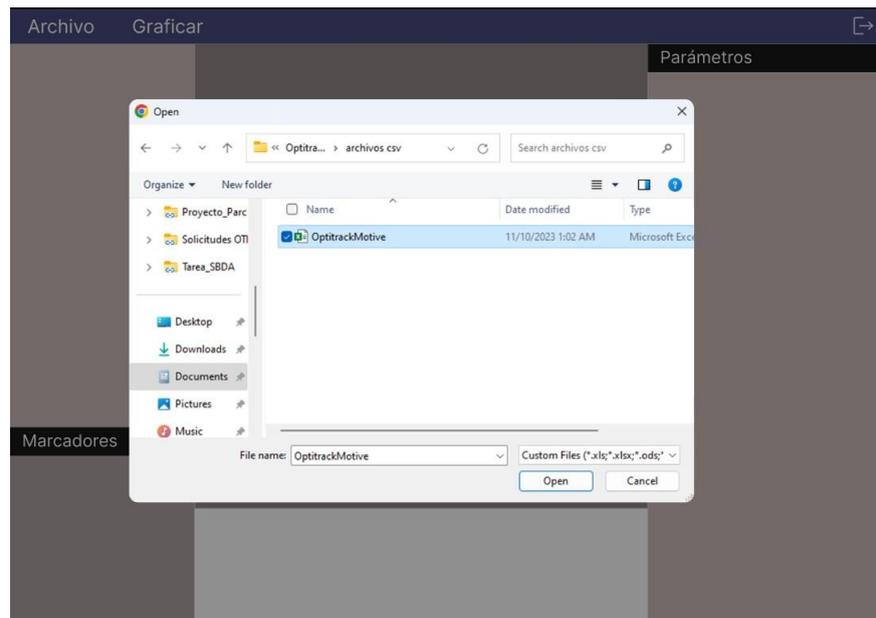
Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario



Nota. Sugiere abrir o cargar un archivo

Figura 3.

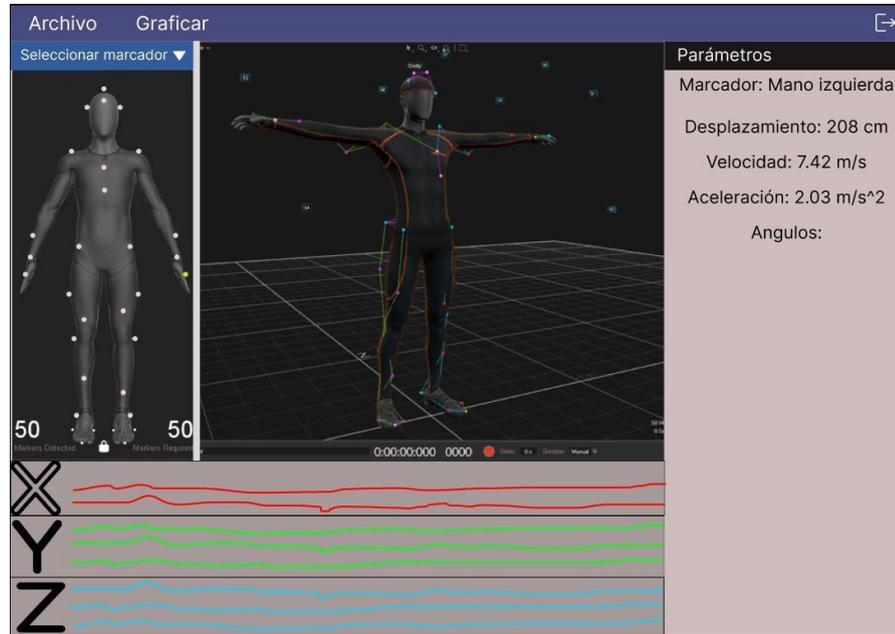
Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario



Nota. Se carga el archivo para que el programa procese los datos.

Figura 4.

Prototipo en Figma de la Interfaz de usuario



Nota. El programa muestra los parámetros (desplazamiento, velocidad, aceleración) del marcador seleccionado.

2.2.2. Calibración del sistema

Se necesita conocer la precisión e incertidumbre del sistema para garantizar mediciones confiables en la captura de movimientos de los atletas. La calibración del sistema Motive es esencial para lograr resultados precisos y consistentes.

Cada calibración del sistema OMC se realizó a mano utilizando una varilla de calibración OptiTrack CWM-250 con una longitud de $250,018 \pm 0,002$ mm.

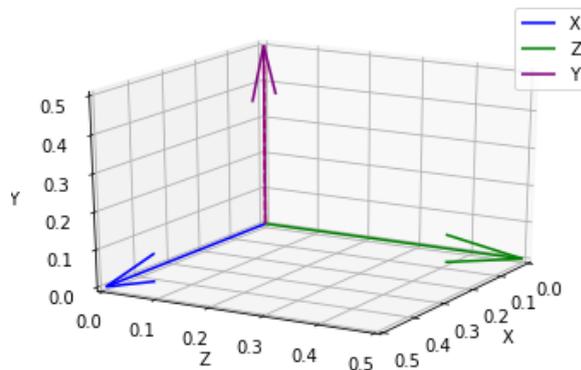
2.2.3. Cálculo del error del sistema

El arreglo de cámaras infrarrojas Optitrack ubicado en el CTI, cuenta con 21 cámaras y se encuentra colocado formando una circunferencia (Ilustración 6). Utilizando el software Motive, se definió el punto central, coordenada (0,0,0) en xyz. En donde, conforme a lo

representado en la configuración actual del software Motive, los ejes XZ se encuentran a nivel del suelo, y el eje Y representa la altura.

Figura 5.

Posición de los ejes



Nota. Referencia de la ubicación de los ejes en el espacio, según la configuración actual del software Motive

Figura 6.

Arreglo de cámaras OptiTrack en el CTI

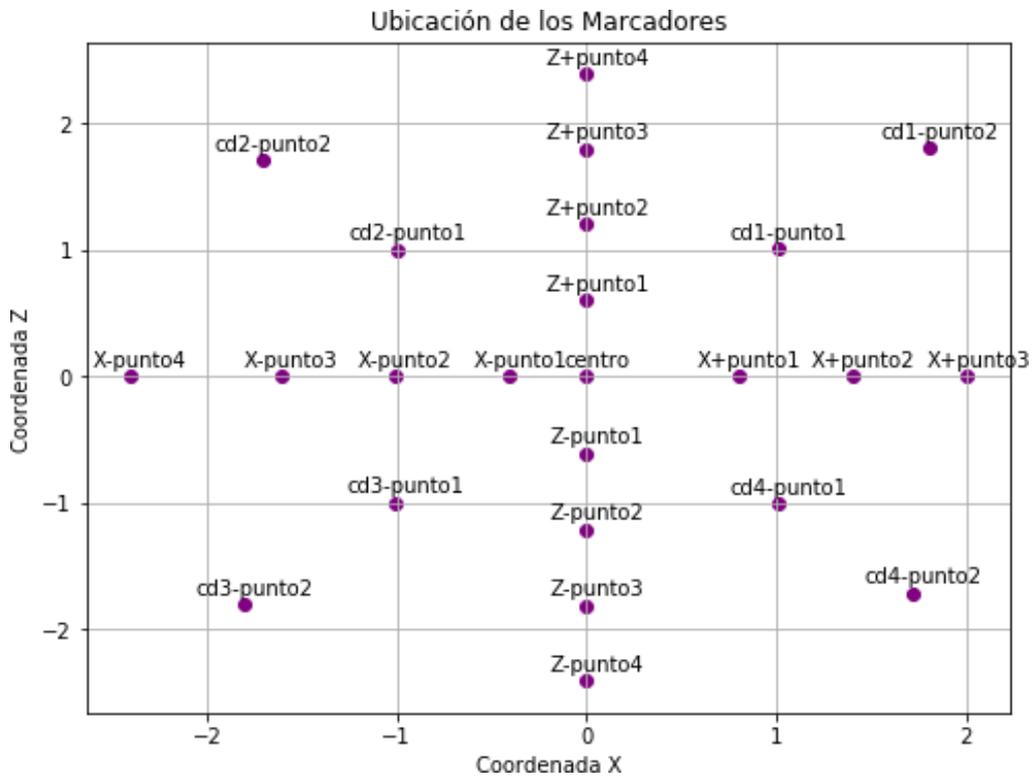


Nota. Arreglo de cámaras OptiTrack se encuentra ubicado en forma de circunferencia. Se pueden observar los marcadores ubicados en el suelo.

Se colocaron 24 marcadores en diferentes puntos de la circunferencia (imagen 2), ubicados de la siguiente manera:

Figura 7.

Ubicación de los marcadores



Nota. Ubicación de los marcadores a nivel del suelo. Ejes XZ, los valores se encuentran en metros.

Las medidas de las coordenadas fueron tomadas con respecto al punto central (0,0,0) siendo lo más exactos posibles, utilizando un flexómetro. A esta medida se le otorgó el nombre de “valor real” y sus valores son los siguientes:

Tabla 1.*Coordenadas de los marcadores*

Punto	X (m)	Y (m)	Z (m)
Z-punto1	0	0	-0,607
Z-punto2	0	0	-1,209
Z-punto3	0	0	-1,811
Z-punto4	0	0	-2,41
Z+punto1	0	0	0,6
Z+punto2	0	0	1,205
Z+punto3	0	0	1,8
X-punto1	-0,406	0	0
X-punto2	-1,008	0	0
X-punto3	-1,611	0	0
X+punto1	0,803	0	0
X+punto2	1,406	0	0
X+punto3	2,006	0	0
X-punto4	-2,405	0	0
Z+punto4	0	0	2,394
cd1-punto1	1,0047987	0	1,0047987
cd1-punto2	1,8059507	0	1,8059507
cd2-punto1	-1,001263	0	1,001263
cd3-punto1	-1,002677	0	-1,002677
cd3-punto2	-1,808072	0	-1,808072
cd4-punto1	1,004799	0	-1,004799
cd4-punto2	1,714733	0	-1,714733
centro	0	0	0
cd2-punto2	-1,708369	0	1,7083699

Nota. Coordenadas referenciales en que fueron ubicados los marcadores.

Se recopiló información, captada por las cámaras infrarrojas, sobre la ubicación de los marcadores durante 1.7 segundos, obteniendo 170 frames.

Se obtuvo un archivo csv. Utilizando las librerías numpy y pandas del lenguaje de programación Python, se realizó el proceso de cleaning.

Una de las consideraciones que cabe tomar en cuenta es que al exportar el CSV de los videos el valor de los marcadores capturados en el eje Z cambian de signo. Por lo que se tuvo que realizar este cambio en la coordenada Z.

Se registra que pese a que los valores tomados por el arreglo de cámaras infrarrojas son de marcadores estáticos, las medidas tomadas no son iguales. Para analizar esta variabilidad en los datos, se calculó la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X^2_i)^2}{n}}$$

Como se requiere medir el error con respecto a la posición, medida por el software Motive, en que se encuentre el marcador en el espacio, no sólo se tomaron datos de marcadores a nivel del suelo (ejes X,Z), sino que se realizó el mismo análisis con valores en y. Se usó una barra en donde se ubicaron 6 marcadores a diferentes alturas:

Tabla 2.

Alturas de ubicación de los marcadores.

Altura en m
0.426 m
0.937 m
1.281 m
1.718 m
1.982 m
2.134 m

Nota. Alturas en las que se ubicaron marcadores sobre cada marcador del suelo.

Al igual que en los marcadores ubicados en el suelo, se tomaron medidas durante 1.70 segundos para cada altura, ubicando la barra sobre cada marcador del suelo.

Para calcular el error absoluto entre el valor medido manualmente “valorReal” y el valor obtenido por el arreglo de cámaras se empleó la fórmula del MAE (Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{predicho,i} - X_{valorReal,i}|$$

Donde el ValorReal corresponde a mediciones manuales realizadas con un flexómetro en los marcadores ubicados tanto en el suelo como en la vara, tomando como referencia el punto 0,0,0. El valor predicho, son los obtenidos por el software Motive y n el número total de observaciones. En este caso, 170 para cada marcador.

A partir de los resultados obtenidos se formularon las siguientes observaciones:

- Mientras más se aleja del punto central, aumenta el Error Absoluto Medio
- La precisión con la que se identifican los marcadores, mientras están a mayor altura también resulta afectada mientras más lejos esté del punto central.

2.2.4. Interpolación

Para el cálculo del error en coordenadas desconocidas, se utilizará la técnica de interpolación de Kriging. El proceso del Kriging es asignar pesos a los vecinos más cercanos, considerados para la estimación. se basa en la teoría de la covarianza espacial y utiliza la información de las distancias y direcciones entre los puntos muestreados para realizar la interpolación. Puede proporcionar estimaciones más precisas y tomar en cuenta la variabilidad espacial de los datos.

Para llevar a cabo esta técnica se creó una tabla en Excel con 4 columnas. Las 3 primeras corresponden a los ejes “X”, “Y”, “Z”, y la cuarta columna “errorTotal”, contiene el valor del MAE para la coordenada especificada en las columnas anteriores.

Se utilizó la función OrdinaryKriging3D de la librería pykrige, que implementa el método de interpolación geoestadística Ordinary Kriging en tres dimensiones.

Para aplicar interpolación de Kriging, se determinó el variograma. El variograma proporciona información sobre cómo la variabilidad en los datos cambia con la distancia. La elección del modelo de variograma es crucial para la precisión de la interpolación de Kriging. Se analizaron diferentes modelos de variograma para seleccionar el modelo más apropiado.

2.2.5. Cálculo de parámetros

El software Motive puede calcular los ángulos y vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración entre los marcadores en el espacio tridimensional utilizando una variedad de técnicas.

2.2.5.1. Ángulos

Los ángulos entre los marcadores se pueden calcular utilizando la trigonometría. Por ejemplo, para calcular el ángulo entre dos marcadores, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{ángulo} = \cos^{-1}\left(\frac{V1 * V2}{|V1||V2|}\right)$$

donde:

- $v1$ y $v2$ son los vectores $V1$ y $V2$.

2.2.5.2. Vectores de desplazamiento

Los vectores de desplazamiento entre los marcadores se pueden calcular utilizando la diferencia entre las posiciones de los marcadores. Por ejemplo, para calcular el vector de desplazamiento entre dos marcadores, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\mathit{vector}_{desplazamiento} = (\mathit{posición}_2 - \mathit{posición}_1)$$

donde:

- $\mathit{posición}_2$ es la posición del segundo marcador.
- $\mathit{posición}_1$ es la posición del primer marcador.

2.2.5.3. Velocidad

La velocidad se puede calcular a partir de los vectores de desplazamiento. La velocidad instantánea es la velocidad en un punto dado en el tiempo. La velocidad media es la velocidad promedio entre dos puntos en el tiempo.

La velocidad instantánea se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\mathit{Velocidad\ instantánea} = \frac{\mathit{vector}_{desplazamiento}}{\mathit{delta\ T}}$$

donde:

- $\mathit{Vector\ desplazamiento}$ es el vector de desplazamiento entre dos puntos en el tiempo.
- $\mathit{Delta\ T}$ es el intervalo de tiempo entre los dos puntos.

La velocidad media se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\mathit{Velocidad\ Media} = \frac{\mathit{posición}_2 - \mathit{posición}_1}{\mathit{delta\ T}}$$

donde:

- $\mathit{posición}_2$ es la posición en un punto posterior en el tiempo.
- $\mathit{posición}_1$ es la posición en un punto anterior en el tiempo.

2.2.5.4. Aceleración

La aceleración se puede calcular a partir de la velocidad. La aceleración instantánea es la aceleración en un punto dado en el tiempo. La aceleración media es la aceleración promedio entre dos puntos en el tiempo.

La aceleración instantánea se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{aceleración instantánea} = \frac{\text{velocidad instantánea} - \text{velocidad anterior}}{\text{delta } T}$$

donde:

- **Velocidad instantánea.** Es la velocidad en un punto dado en el tiempo.
- **Velocidad anterior.** Es la velocidad en un punto anterior en el tiempo.
- **Delta T.** Es el intervalo de tiempo entre los dos puntos.

La aceleración media se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Aceleración media} = \frac{(\text{velocidad}_1 - \text{velocidad}_2)}{\text{delta } T}$$

donde:

- `velocidad_2` es la velocidad en un punto posterior en el tiempo.
- `velocidad_1` es la velocidad en un punto anterior en el tiempo

3.2.1. Parámetros Calculados

Se logró calcular ángulos y vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración entre puntos en el espacio tridimensional.

Desplazamiento:

$$x = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2}$$

Velocidad:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i}$$

Aceleración:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$$

Ángulos:

$$\theta = \arccos \left(\frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1||v_2|} \right)$$

3.2.1.1. Obtención de la incertidumbre en los parámetros de movimiento y ángulos.

Dado que se obtuvo la precisión estimada, en todos los puntos en el espacio que captura el software Motive, se logró calcular, mediante propagación de error, el error e incertidumbre de cada parámetro de movimiento.

Fórmula de error de propagación:

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \epsilon_x \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \epsilon_y \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \epsilon_z \right)^2}$$

Donde ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z es el error en x, y, z respectivamente.

Incertidumbre del desplazamiento:

$$\delta d = \sqrt{\frac{(X_f - X_o)^2(\delta X_f^2 + \delta X_o^2) + (Y_f - Y_o)^2(\delta Y_f^2 + \delta Y_o^2) + (Z_f - Z_o)^2(\delta Z_f^2 + \delta Z_o^2)}{(X_f - X_o)^2 + (Y_f - Y_o)^2 + (Z_f - Z_o)^2}}$$

Incertidumbre de la velocidad:

$$\delta v = \sqrt{\frac{\delta d^2}{t^2} + \frac{d^2 \delta t^2}{t^4}}$$

Incertidumbre de la aceleración:

$$\delta a = \sqrt{\frac{\delta v^2}{t^2} + \frac{v^2 \delta t^2}{t^4}}$$

Incertidumbre de los ángulos:

$$\theta = \sqrt{\delta p^2 + \frac{p^2 \delta m^2}{m^2} + \frac{p^2 \delta n^2}{n^2}} / \sqrt{m^2 + n^2 - p^2}$$

Capítulo 3

3.1 Plan de Implementación

Se realizó un diagrama de Gantt el cual muestra el cronograma utilizado para el desarrollo del proyecto. El proyecto tiene como fecha de inicio del 03 de octubre de 2023 y fecha de finalización el 15 de enero de 2023. De los cuales se trabajaron 14 semanas. La Estructura del Desglose del Trabajo (EDT) se compone de las siguientes etapas:

1. *Introducción al proyecto (03/10/2023 – 22/10/2023)*

Revisión e introducción al proyecto

Se tuvieron reuniones con las partes interesadas del proyecto de MI (el cliente y el tutor), los cuales nos proporcionaron una introducción general al proyecto, destacando la importancia y los beneficios que se esperan alcanzar.

Investigación

La Investigación, fue una parte crucial de esta etapa inicial. Se investigó sobre estudios relevantes de casos similares y acerca del funcionamiento de las cámaras OptiTrack y el software Motive versión 1.5.0.

Esta etapa se extendió hasta el inicio de la etapa tres, puesto a que el proyecto fue en su mayoría, de carácter investigativo.

Proyecciones

Se realizaron proyecciones preliminares sobre el impacto, el alcance y los resultados esperados del proyecto.

Directrices/Definición de Fases

Elaboración de una planificación detallada para llevar a cabo el proyecto. Se definieron las etapas del proyecto y las tareas a realizarse dentro de cada una. Se asignaron roles y responsabilidades a cada integrante.

Inicio del proyecto

Comienzo de la ejecución del proyecto.

2. Definición y planificación del proyecto (23/10/2023 – 12/11/2023)

- Definición del alcance y de los objetivos
Se identificaron las expectativas del cliente y se delimitó a la redacción del alcance del proyecto. Se establecieron los objetivos generales y específicos del proyecto.
- Documentación del proyecto (Capítulo 1)
Redacción del primer capítulo de la documentación. Este capítulo incluyó: descripción del proyecto, descripción y justificación del problema, marco teórico y objetivos generales y específicos.
- Gestión de riesgos
Se llevó a cabo un proceso detallado de identificación de riesgos, donde se analizaron posibles obstáculos que podrían afectar el éxito del proyecto.

3. Análisis y desarrollo del proyecto (13/11/2023 – 23/12/2023)

- Documentación del proyecto (Capítulo 2)
Redacción del segundo capítulo de la documentación. Este capítulo incluyó: requerimientos funcionales, requerimientos no funcionales, alcance, riesgos y beneficios de la solución, diseño del prototipo y metodología.
- Fase 1: Pruebas y recolección de datos del CTI
Se calibraron las cámaras para que puedan reconocer marcadores de hasta 215cm de altura. Identificación de un plano cartesiano dentro del área que abarcan las cámaras infrarrojas. Recolección de datos de las coordenadas proporcionados por el software Motive y de forma manual.
- Fase 2: Cálculo del error del arreglo de cámaras OptiTrack
Proceso de cleaning a los datos recolectados y aplicación de métodos estadísticos para obtener el error de las coordenadas proporcionadas

por el software y el porcentaje de precisión con que las identifican dependiendo de la posición del marcador dentro del área.

- Fase 3: Cálculo de parámetros
Implementación de fórmulas físicas, para el cálculo de la aceleración, velocidad y desplazamiento de los marcadores de un punto a otro.
- Fase 4: Implementación de software de visualización de parámetros
Desarrollo de una aplicación de escritorio, en donde se ingresa el archivo tipo .csv que proporciona el motive para visualizar las características de los movimientos del atleta.
- Estado y Seguimiento
Mantener un registro continuo del progreso del proyecto y garantizar que esté en línea con los objetivos establecidos.
- Actualizaciones del diagrama

4. Rendimiento y supervisión (02/01/2023 – 15/01/2023)

- Pruebas y Testing
- Seguimiento de costes y esfuerzos
- Documentación del proyecto (Capítulo 3 y 4)
Redacción del cuarto y terceros capítulos de la documentación. Estos capítulos incluyeron: Plan de implementación, pruebas, resultados, conclusiones, recomendaciones.

3.3. Pruebas

El sistema ha sido sometido a pruebas para asegurar su correcto desempeño en distintas plataformas y entornos. Estas pruebas, llevadas a cabo en sistemas operativos Windows, han validado tanto el correcto funcionamiento del programa de escritorio como su usabilidad.

3.3.1. Cálculo de parámetros

Se evaluó la interfaz en dispositivos de escritorio con variadas resoluciones de pantalla, garantizando su adaptabilidad.

Se verificó la utilidad del programa para entrenadores y deportistas de halterofilia asegurando que cumpla con sus necesidades específicas.

Figura 8.

Interfaz de usuario gráfica



Nota. Pantalla de carga de archivo

Figura 9.

Interfaz de usuario gráfica



Nota. Pantalla de entrada de datos

Figura 10.

Interfaz de usuario gráfica



Nota. Selección del marcador e ingreso del rango de tiempo en que se desean calcular los parámetros.

Figura 11.

Interfaz de usuario gráfica



Nota. Resultados de los parámetros calculados

Figura 12.

Interfaz de usuario gráfica



Nota. Selección de marcadores para calcular los ángulos de extremidades en un tiempo determinado.

3.4. Resultados

El desarrollo ha llevado a la obtención de resultados. A continuación, se resaltan: Se descubrió que a pesar de que los marcadores se encontraban estáticos en el suelo, existía una variación en la posición de los mismos a partir de los milímetros en cada toma. Calculando la desviación estándar de los marcadores a nivel del suelo, para cada eje XYZ, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. *Desviación estándar de los marcadores*

Marcador	X (m)	Y (m)	Z (m)
Z-punto4	0,00013	0,000387	0,000825
Z-punto3	0,000088	0,000089	0,000194
Z-punto2	0,000049	0,000049	0,000068
Z-punto1	0,000022	0,000052	0,000034
Z+punto4	0,000013	0,000016	0,000027
Z+punto3	0,000057	0,000191	0,000132
Z+punto2	0,000014	0,000016	0,000028
Z+punto1	0,000184	0,000224	0,000155
X-punto4	0,000064	0,000155	0,000149
X-punto2	0,000079	0,000074	0,000083
X-punto1	0,000052	0,000031	0,000116
X+punto3	0,000082	0,000045	0,000022
X+punto2	0,000083	0,000082	0,000069
X+punto1	0,000028	0,000029	0,000039
centro	0,000009	0,000019	0,000017
cd4-punto2	0,000166	0,0004	0,000907
cd4-punto1	0,000057	0,000105	0,000091
cd3-punto2	0,000082	0,000041	0,000107
cd3-punto1	0,000067	0,000036	0,000032
cd1-punto1	0,00006	0,000064	0,000057
cd1-punto2	0,000114	0,000051	0,00005
cd2-punto1	0,000032	0,000019	0,000018
cd2-punto2	0,0033	0,001697	0,002185
X-punto3	0,00009	0,000046	0,000053

Nota. Desviación estándar de las medidas tomadas para cada marcador a nivel del suelo.

Gran parte de los valores de la desviación estándar se encuentran por debajo de $1 \times 10^{-3} m$, lo que sugiere que los datos no muestran fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo o entre diferentes observaciones.

3.4.1. Cálculo del MAE

Se observó a través del cálculo del error medio, lo siguiente:

Tabla 4.

Valor del MAE

Altura (m)	centro	Cd4-punto2	Cd3-punto2	Cd2-punto2	Z-punto4	Z+punto4	X-punto4
0	0.00376	0.01811	0.00560	0.06386	0.01003	0.00511	0.01042
0.426	0.00478	0.01108	0.01053	0.07108	0.00956	0.00579	0.01500
0.937	0.00499	0.01275	0.00614	0.07262	0.01160	0.00801	0.01227
1.281	0.00729	0.01208	0.00769	-	0.01047	0.00810	-
1.718	0.00656	0.01340	0.01431	-	0.01019	0.01115	-
1.984	0.00797	0.01388	0.01598	-	0.01231	0.01262	-
2.134	0.00701	0.01815	0.01571	-	0.01078	-	-
Prom	0,00605	0,01421	0,01085	0,06919	0,01069	0,00846	0,01256

Nota. Valor del MAE en metros por cada altura en determinados puntos con su respectivo promedio.

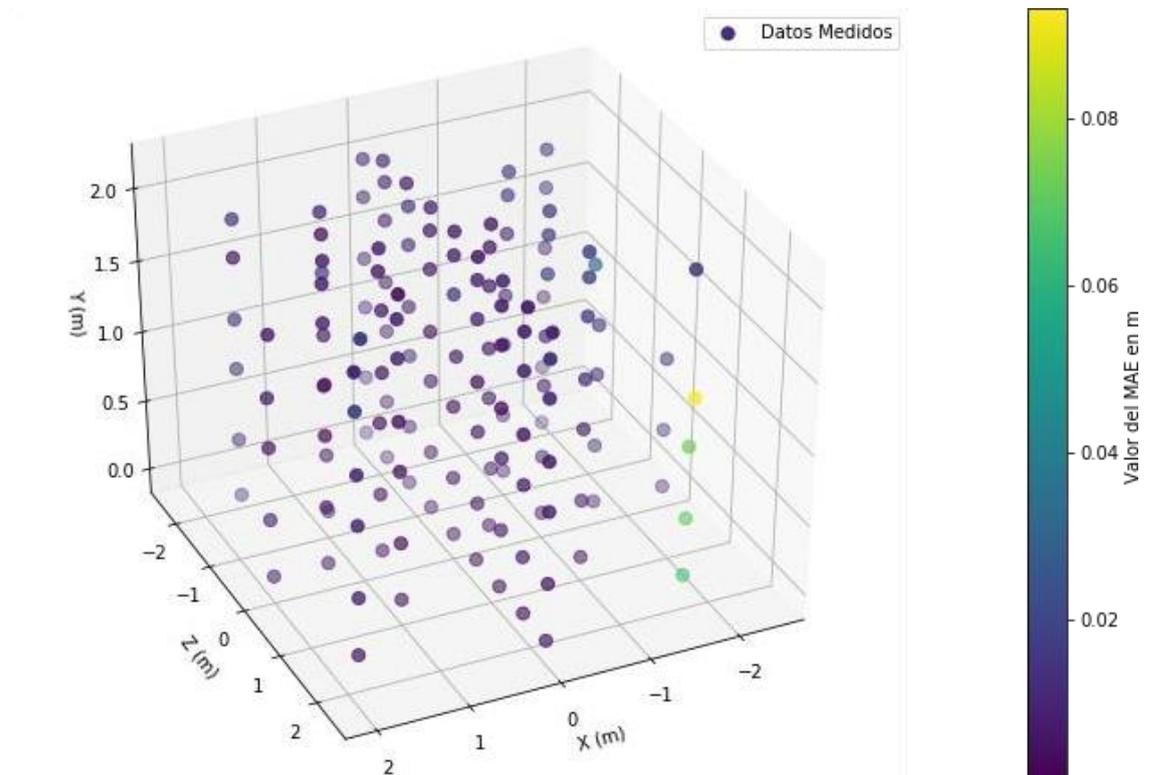
Los resultados muestran que, al calcular el Error Absoluto Medio (MAE), se determinó un valor medio de error de aproximadamente 0.00605m en el centro del área de cobertura. Este valor proporciona una indicación confiable de la precisión de las mediciones en la región central del espacio de interés (Los valores del MAE de todos los marcadores se encuentran en el Apéndice).

En cuanto a los marcadores cercanos al borde del límite del área de cobertura, se observaron fluctuaciones en los valores de error. Específicamente, los valores de error oscilaron entre 0.01421 y 0.06919.

Las gráficas a continuación mostrarán los marcadores ubicados a lo largo de toda el área junto con su respectivo valor MAE.

Figura 13.

Gráfico tridimensional de los marcadores con su valor de error



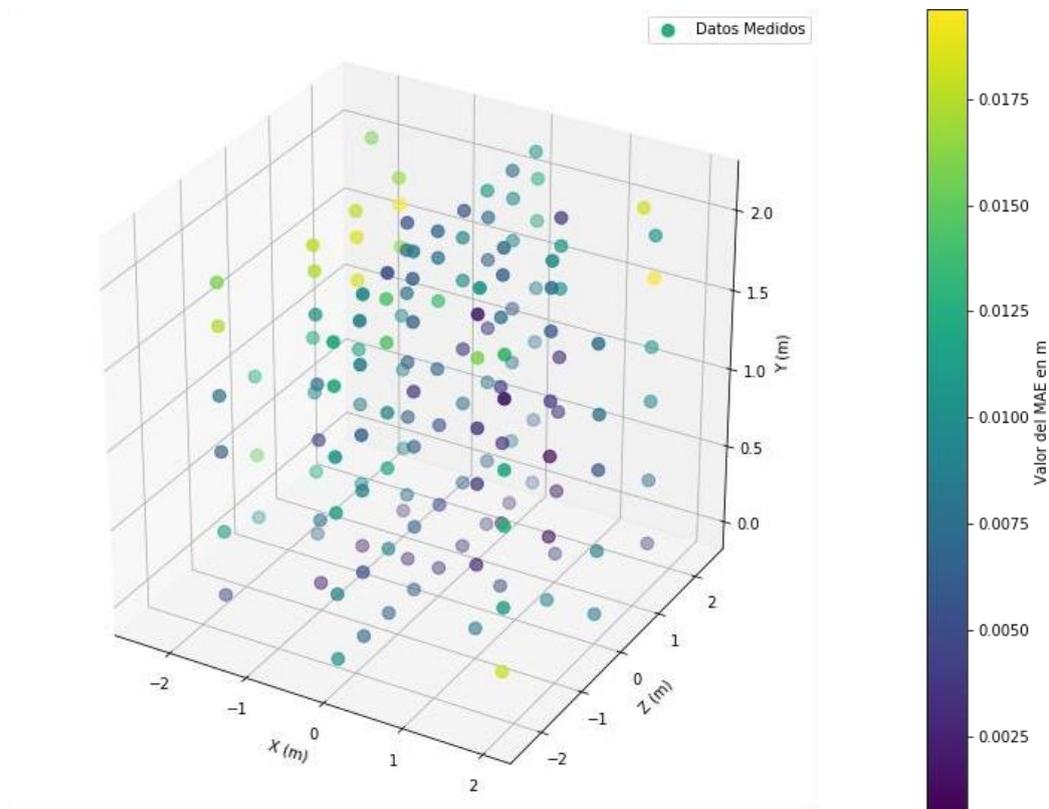
Nota. Marcadores ubicados con su valor de MAE

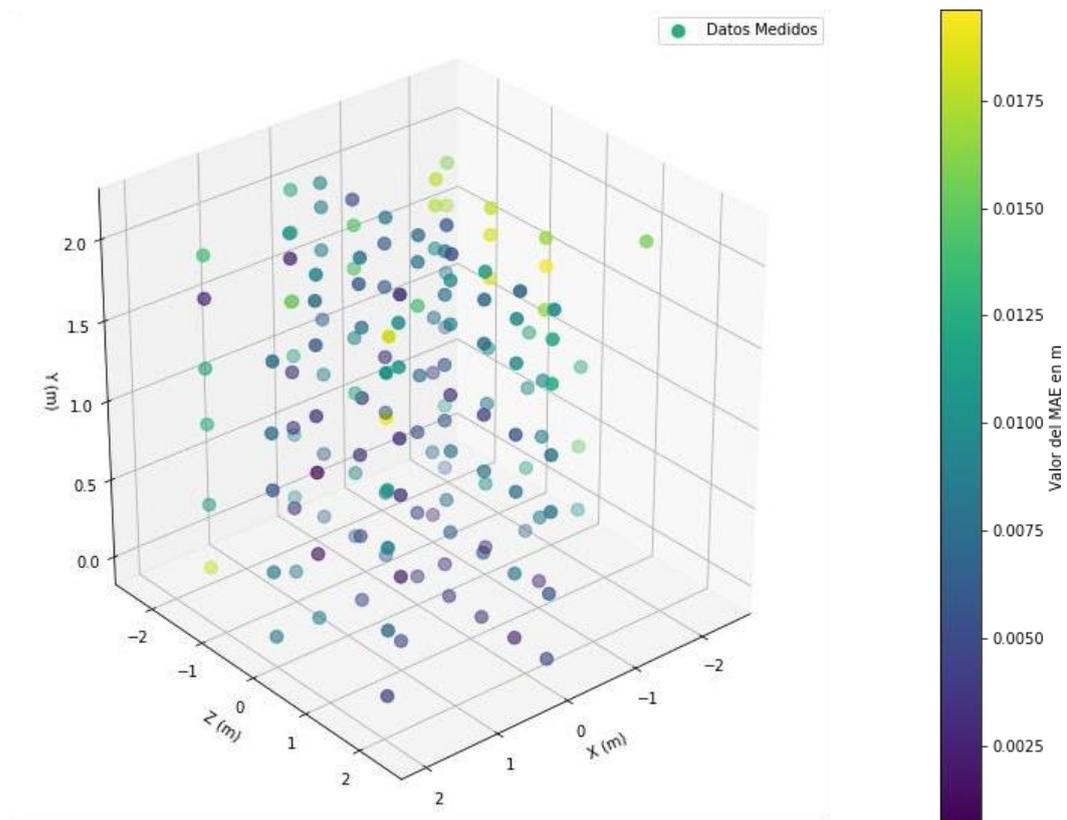
En esta gráfica se encuentran representados, los 24 marcadores en los 7 niveles de altura. Sin embargo, se puede observar, que a medida que la altura incrementaba habían marcadores que dejaban de ser reconocidos por el arreglo de cámaras. Con base en la barra de colores, que representa el valor del error absoluto medio en m, se puede observar que una gran parte de los puntos poseen un MAE inferior a 0.02m. Sin embargo, en la esquina inferior derecha, existen cuatro puntos con un MAE, que

supera los 0.05 m. Estos puntos corresponden al marcador cd4-punto2. Para poder visualizar mejor, el incremento del error en mi espacio tridimensional se decidió no tomar en cuenta este marcador, debido a que el error en ese punto llegaba a ser el triple, con respecto a los demás marcadores.

Figura 14 y 15.

Gráfico tridimensional de los marcadores con su valor de error (excepto el marcador cd4-punto2)





Nota. Mapa de puntos de marcadores desde diferentes ángulos.

Los gráficos muestran los marcadores desde diferentes perspectivas. Las áreas más oscuras indican un menor error en las mediciones. Las áreas más claras representan zonas con mayor error en las mediciones. Se observó que el error puede variar desde 0.0005 m hasta 0.0200 m a lo largo del área que identifican las cámaras. Lo que indica una amplia gama de valores de error en diferentes ubicaciones y alturas. Como se puede observar, los puntos en zonas centrales poseen un menor MAE y este va incrementando en sectores más altos y cercanos al límite del área.

Ambas ilustraciones se rigen por la misma barra de colores que proporciona información sobre la correspondencia entre los valores de datos y los colores presentes en el gráfico.

Analizando la tabla con valores del MAE y los gráficos de los marcadores, se evidenció que partir de una altura de 129 cm, existe una limitación en el

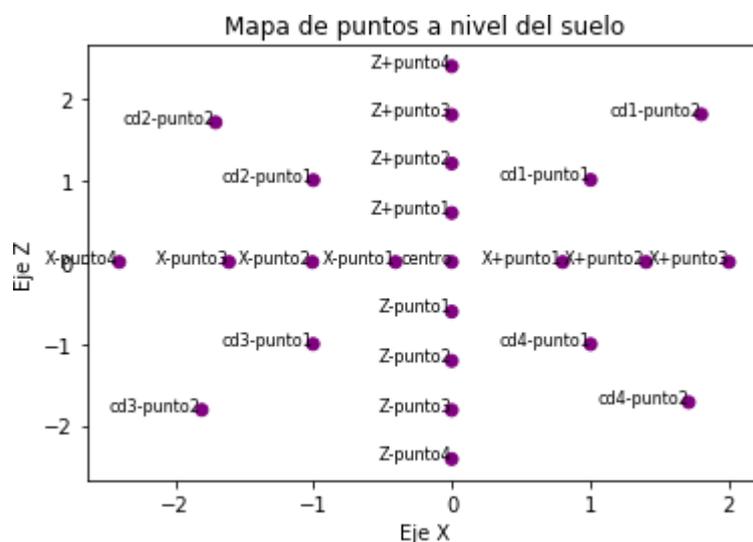
reconocimiento de marcadores en el eje X negativo. En particular, el marcador X-punto 4 dejó de ser reconocido por las cámaras OptiTrack.

Conforme se incrementaba la altura, se reflejó un patrón de reducción en el reconocimiento de marcadores ubicados en los cuadrantes 1 y 2, especialmente aquellos más alejados del centro del área. En la última altura evaluada, únicamente 18 de los 24 marcadores fueron reconocidos por las cámaras infrarrojas. Los marcadores excluidos en esta instancia fueron: X+punto3, cd2-punto2, Z+punto4, cd2-punto1, X-punto3 y X-punto4.

Esto evidencia una disminución en la capacidad de las cámaras infrarrojas para captar señales precisas a mayores alturas en regiones periféricas del área de interés. Lo que sugiere posibles limitaciones en la precisión de las mediciones en esos espacios.

Figura 16.

Marcadores reconocidos a nivel del suelo

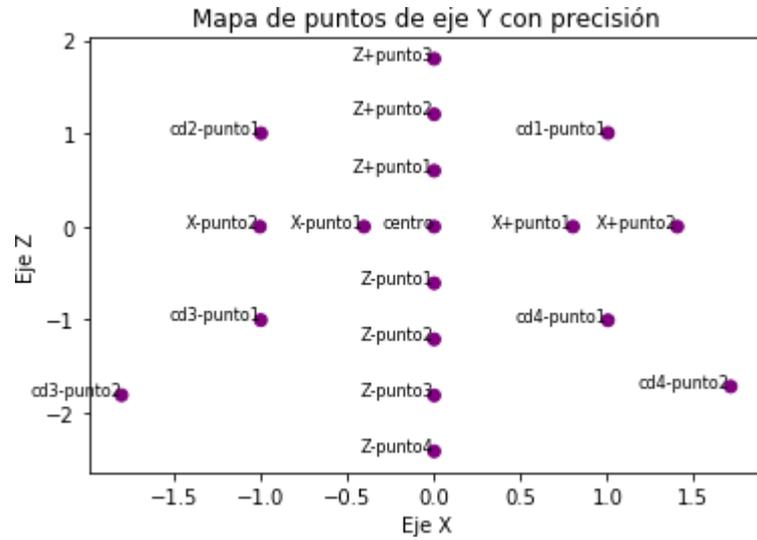


Nota. Marcadores reconocidos por el arreglo de cámaras a nivel del suelo.

Los valores de los ejes están en metros.

Figura 17.

Marcadores reconocidos a 2.15m de altura



Nota. Marcadores reconocidos por el arreglo de cámaras a 2.13 m de altura. Los valores de los ejes están en metros.

3.4.2. Interpolación de Kriging

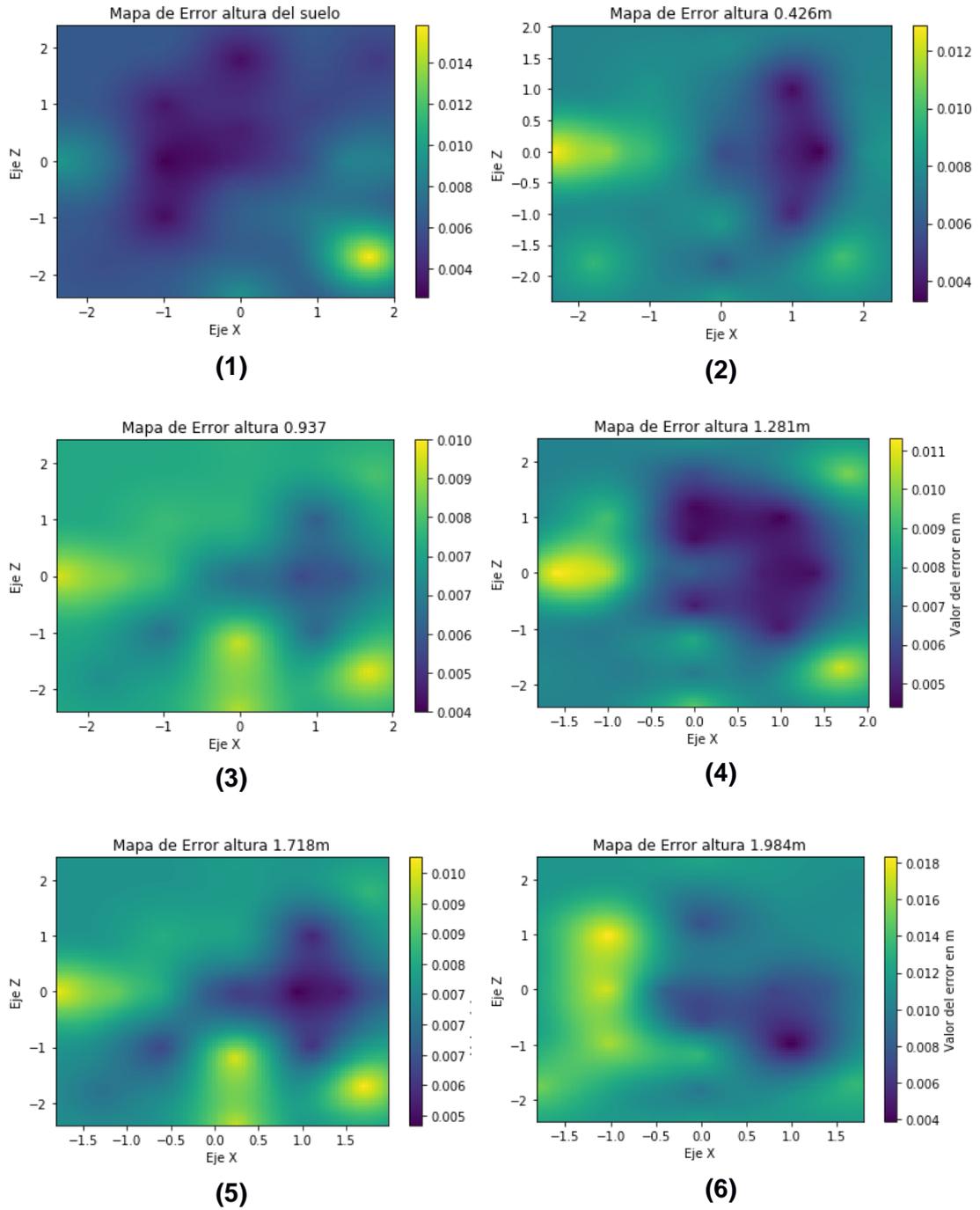
El análisis de los resultados revela patrones espaciales significativos en la distribución del error, proporcionando información sobre las regiones donde el sistema exhibe mayor o menor precisión.

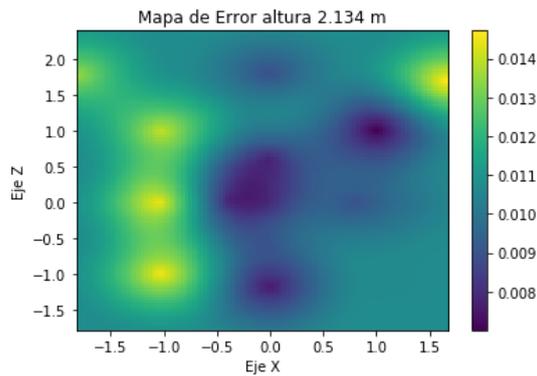
Se aplicó interpolación de Kriging con variograma esférico, a las coordenadas XZ de cada una de las siete alturas Y, que se encontraban en archivos .xlsx por separado, y se generaron mapas de error utilizando la función *plt.imshow* de *Matplotlib*. Estos mapas permiten observar cómo cambia el error en diferentes puntos del plano a diferentes alturas.

Los gráficos que se mostrarán a continuación corresponden a los mapas de error para cada altura. Estos se encuentran determinados por el eje X y el eje Z.

Tabla 5.

Gráficos de mapa de error de cada altura analizada.





(7)

Nota. Mapas de error por cada altura, utilizando interpolación de Kriging.

Al observar los mapas para alturas específicas, se ha podido identificar cómo varía el error a diferentes alturas.

- (1) **Gráfico a la altura del nivel del suelo.** El error mínimo a esta altura es de 0.0017m y el máximo es 0.018m. El error máximo lo encontramos en el cuadrante 4, y corresponde al valor del MAE del punto cd4-punto2.
- (2) **Gráfico de mapa de error a una altura de 0.426 m.** El error mínimo es de 0.0014m. El error máximo es de 0.015m, que se encuentra en el punto X-punto4. Las áreas con menor error corresponden a las secciones del centro y el primer cuadrante.
- (3) **Gráfico de mapa de error a una altura de 0.937 m.** El error mínimo es de 0.0029m. El error máximo es de 0.0127m correspondiente al marcador cd4-punto2. Se puede observar que, en el cuarto cuadrante, así como en los externos del eje X y Z negativo, el error se encuentra por encima de los 0.008m.
- (4) **Gráfico de mapa de error a una altura de 1.281 m.** El error mínimo es de 0.0033 m. El máximo es 0.01246 que corresponde al marcador X-punto3. A diferencia de los mapas

de error anterior, en este, el rango del eje X es de [-1.5m ; 2.0m], esto se debe a que los marcadores “X-punto4” y “cd2-punto2”, dejaron de ser reconocidos. El área con un menor error corresponde al área central y el primer cuadrante. El error en esta área oscila entre los 0.0033 y 0.008m.

(5) Gráfico de mapa de error a una altura de 1.718 m. El error mínimo es de 0.0048. El máximo error es de 0.0313m correspondiente al marcador X-punto3.

(6) Gráfico de mapa de error a una altura de 1.984 m. El error mínimo es de 0.0024m. El máximo error es de 0.0196m en el marcador cd2-punto1. En este nivel, sólo se identificaron 20 de los 24 marcadores que se tenían en un inicio. El área central, y sobre los ejes X y Z positivos poseen un error por debajo de los 0.008m.

(7) Gráfico de mapa de error a una altura de 2.134 m. El error mínimo es de 0.033m. El máximo error es de 0.0124m. En este nivel, sólo se identificaron 18 de los 24 marcadores que se tenían en un inicio.

3.4.3. Extracción de datos BCH y visualización en 3D

Para llevar a cabo el análisis del movimiento del atleta, se extrajeron los datos del archivo BVH generado por el software OptiTrack Motive versión 1.5.0.

En el proceso de extracción de datos, se utilizó Python con la ayuda de la librería `transforms3d` para convertir las coordenadas eulerianas en matrices de rotación y viceversa. Esto permitió obtener las posiciones y rotaciones de las articulaciones del atleta a partir de los datos del archivo BVH.

Para visualizar y analizar el movimiento del atleta, se implementó un código en Python que utiliza la librería `matplotlib` para crear una animación tridimensional a partir

de un archivo BVH (Biovision Hierarchy). El código esencial para esta tarea se presenta a continuación:

```
from transforms3d.euler import euler2mat, mat2euler
from matplotlib.animation import FuncAnimation,
FFMpegWriter
import matplotlib.pyplot as plt

def plot_all_frames(self, save_path="animation.mp4"):
    import matplotlib.pyplot as plt
    from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d, Axes3D
    fig = plt.figure()
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

    print("Configurando la animación...")
    writer = FFMpegWriter(fps=self.fps)
    with writer.saving(fig, save_path, 100):
        for i in range(self.frames):
            self.plot_frame(i, fig, ax)
            print(f"Visualizando el fotograma {i +
1}/{self.frames}")
            writer.grab_frame()

    print("Guardando la animación completa...")
```

La función `plot_all_frames` genera la animación y la guarda como un archivo de video que por defecto tendrá el nombre de "animación.mp4". Recibe los parámetros "self", que corresponde a la instancia actual de la clase.

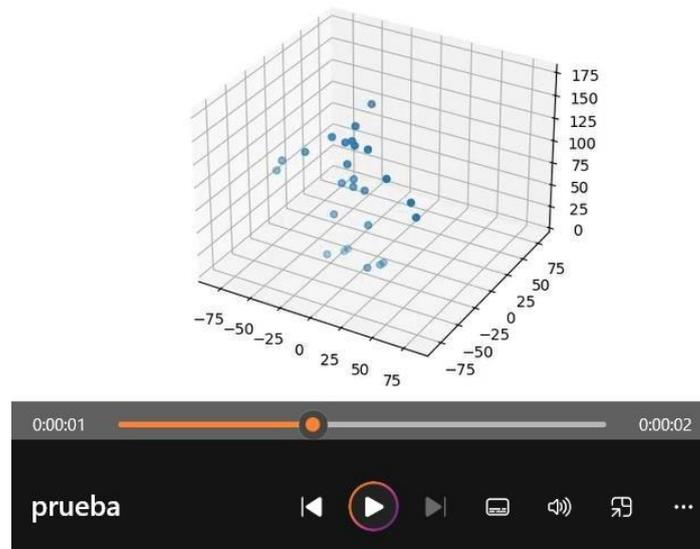
La declaración de `fig` y `ax`, se crea una figura y un subgráfico tridimensional para mostrar la animación. "FFMpegWriter" configura el escritor de video con la frecuencia de frames especificada en "self.fps". Luego, itera sobre los frames en el rango dado por "self.frames", utiliza la función "plot_frame" para dibujar cada frame y "writer.grab_frame()" para grabar el frame en el video.

```
if __name__ == '__main__':
    anim = Bvh()
    anim.parse_file("ejemplos/testhlt1.bvh")
    anim.plot_all_frames(save_path='animacion.mp4')
```

En el bloque principal (`_main_`), se crea una instancia de la clase `Bvh`, se analiza un archivo BVH específico, y se llama a la función `plot_all_frames` para generar la animación y guardarla como un archivo de video llamado `animacion.mp4`.

Figura 18.

Video mp4 del cuerpo del atleta.



Nota. Video mp4 generado a partir del archivo bvh. Se puede observar el cuerpo tridimensional.

Visualización Efectiva

La plataforma proporciona información y visualización detallada de los movimientos de los atletas.

3.4 Análisis De Costos

Tabla 6.

Análisis de Costos

Costos principales:	
Horas/Hombre:	
Desarrollo del software	
2 desarrolladores / Investigadores	4 meses \$5 000
Gastos Operativos	
Materiales de oficina	Aprox. \$20
	Considerando un proyecto altamente presencial
Pasaje/Comida/viáticos	\$50
Total	\$5 70.00

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- El sistema Motive demostró una alta precisión en la captura de movimientos. Se logró determinar la incertidumbre de las cámaras infrarrojas en cada punto en el espacio tridimensional mediante técnicas de interpolación, lo que proporciona información valiosa sobre la precisión en la posición de los marcadores.
- La implementación de ecuaciones físicas permitió calcular con precisión ángulos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones entre marcadores en el espacio tridimensional, ofreciendo una representación detallada de los movimientos de los atletas.
- Se logró desarrollar una plataforma de visualización efectiva que presenta de manera clara y detallada la información de los parámetros obtenidos durante la actividad física, incluyendo parámetros de movimiento y ángulos junto con su respectiva incertidumbre.
- Los resultados obtenidos tienen un impacto directo en el ámbito deportivo, proporcionando a atletas y entrenadores una valiosa herramienta para evaluar y mejorar la técnica, postura y rendimiento en la halterofilia.

4.1.2 Recomendaciones

- A pesar de la alta precisión del sistema Motive, se observó que, al exportar el archivo de Excel con la información del video de captura de movimiento, existe una inversión en el signo de los valores en el eje Z, lo que requiere ajustes en la interpretación de los datos.
- En caso de obtener una nueva licencia de una versión más reciente de Motive, implementar procesos de limpieza en los datos generados por Motive con el fin de eliminar información innecesaria, como falsos marcadores detectados o registros nulos.
- Realizar mejoras en el sistema operativo y características del CPU para asegurar un rendimiento óptimo y satisfacer las necesidades específicas de las cámaras infrarrojas.
- Evaluar y seleccionar indumentaria más adecuada en términos de tamaño y ajuste para garantizar la comodidad y libertad de movimiento durante las sesiones de captura.

Referencias

- [1] C. J. & B. A. Payton, Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise: the British Association of Sport and Exercise Sciences guide, Routledge, 2017.
- [2] G. GUERRA-FILHO, Optical Motion Capture: Theory and Implementation., RITA, 2005.
- [3] G. a. R. M. Nagymáté, «Application of OptiTrack motion capture systems in human movement analysis: A systematic literature review.,» Recent Innovations in Mechatronics, 2018.
- [4] Autodesk, «Autodesk,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.es/products/3ds-max/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. [Último acceso: 24 10 2024].
- [5] T. Roosendaal, «Blender,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.blender.org/about/>. [Último acceso: 24 10 2023].
- [6] S. Winiarski, «Human locomotion analysis technique with SIMI Motion.,» Acta of Bioengineering and Biomechanics, 2003.

Apéndice A

	Coordenada	X (m)	Y(m)	Z(m)	MAE-posición-marcador (m)
0	Z-punto4	0.000000	0	-2.410000	0.010032
1	Z-punto3	0.000000	0	-1.811000	0.00687153
2	Z-punto2	0.000000	0	-1.209000	0.00675087
3	Z-punto1	0.000000	0	-0.607000	0.00626889
4	Z+punto4	0.000000	0	2.394000	0.00511607
5	Z+punto3	0.000000	0	1.800000	0.00242207
6	Z+punto2	0.000000	0	1.205000	0.00413174
7	Z+punto1	0.000000	0	0.600000	0.00328296
8	X-punto4	-2.405000	0	0.000000	0.0104225
9	X-punto2	-1.008000	0	0.000000	0.00175046
10	X-punto1	-0.406000	0	0.000000	0.00303893
11	X+punto3	2.006000	0	0.000000	0.00854417
12	X+punto2	1.406000	0	0.000000	0.0089845
13	X+punto1	0.803000	0	0.000000	0.00533681
14	centro	0.000000	0	0.000000	0.00376348
15	cd4-punto2	1.714733	0	-1.714733	0.0181057
16	cd4-punto1	1.004799	0	-1.004799	0.00876369
17	cd3-punto2	-1.808072	0	-1.808072	0.00560733
18	cd3-punto1	-1.002677	0	-1.002677	0.0023195
19	cd1-punto1	1.004799	0	1.004799	0.00506958
20	cd1-punto2	1.805951	0	1.805951	0.00453542
21	cd2-punto1	-1.001263	0	1.001263	0.00278044
22	cd2-punto2	-1.708369	0	1.708369	0.0638644
23	X-punto3	-1.611000	0	0.000000	0.00693321

	Marcador	X (m)	Y(m)	Z(m)	MAE-posición-marcador (m)
0	X-punto3	-1.611000	0.426	0.000000	0.012579
1	Z-punto4	0.000000	0.426	-2.410000	0.009556
2	Z-punto3	0.000000	0.426	-1.811000	0.005232
3	Z-punto2	0.000000	0.426	-1.209000	0.009239
4	Z-punto1	0.000000	0.426	-0.607000	0.006442
5	Z+punto4	0.000000	0.426	2.394000	0.005791
6	Z+punto3	0.000000	0.426	1.800000	0.008401
7	Z+punto2	0.000000	0.426	1.205000	0.006997
8	Z+punto1	0.000000	0.426	0.600000	0.006611
9	X-punto4	-2.405000	0.426	0.000000	0.015001
10	X-punto2	-1.008000	0.430	0.000000	0.010179
11	X-punto1	-0.406000	0.426	0.000000	0.008188
12	X+punto3	2.006000	0.426	0.000000	0.008571
13	X+punto2	1.406000	0.426	0.000000	0.001446
14	X+punto1	0.803000	0.426	0.000000	0.003964
15	centro	0.000000	0.426	0.000000	0.004748
16	cd4-punto2	1.714734	0.426	-1.714734	0.011084
17	cd4-punto1	1.004799	0.426	-1.004799	0.002848
18	cd3-punto2	-1.808072	0.426	-1.808072	0.010530
19	cd3-punto1	-1.002677	0.426	-1.002677	0.007579
20	cd1-punto1	1.004799	0.426	1.004799	0.001876
21	cd1-punto2	1.805951	0.426	1.805951	0.007290
22	cd2-punto1	-1.001263	0.426	1.001263	0.008695
23	cd2-punto2	-1.708370	0.426	1.708370	0.071077

	Marcador	X (m)	Y(m)	Z(m)	MAE-posición-marcador (m)
0	X-punto3	-1.611000	0.937	0.000000	0.00980926
1	Z-punto4	0.000000	0.937	-2.410000	0.0116024
2	Z-punto3	0.000000	0.937	-1.811000	0.00907366
3	Z-punto2	0.000000	0.937	-1.209000	0.0122569
4	Z-punto1	0.000000	0.937	-0.607000	0.00665065
5	Z+punto4	0.000000	0.937	2.394000	0.00801312
6	Z+punto3	0.000000	0.937	1.800000	0.00777951
7	Z+punto2	0.000000	0.937	1.205000	0.00818019
8	Z+punto1	0.000000	0.937	0.600000	0.00780985
9	X-punto4	-2.405000	0.937	0.000000	0.0122652
10	X-punto2	-1.008000	0.937	0.000000	0.00869708
11	X-punto1	-0.406000	0.937	0.000000	0.00582534
12	X+punto3	2.006000	0.937	0.000000	0.00578547
13	X+punto2	1.406000	0.937	0.000000	0.00401798
14	X+punto1	0.803000	0.937	0.000000	0.00294424
15	centro	0.000000	0.937	0.000000	0.00499836
16	cd4-punto2	1.714734	0.937	-1.714734	0.0127494
17	cd4-punto1	1.004799	0.937	-1.004799	0.00380943
18	cd3-punto2	-1.808072	0.937	-1.808072	0.00614474
19	cd3-punto1	-1.002677	0.937	-1.002677	0.00448131
20	cd1-punto1	1.004799	0.937	1.004799	0.003407
21	cd1-punto2	1.805951	0.937	1.805951	0.00917228
22	cd2-punto1	-1.001263	0.937	1.001263	0.00873241
23	cd2-punto2	-1.708370	0.937	1.708370	0.0726204

	Marcador	X (m)	Y(m)	Z(m)	MAE-posición-marcador (m)
0	X-punto3	-1.611000	1.281	0.000000	0.012465
1	Z-punto3	0.000000	1.281	-1.811000	0.006556
2	Z-punto2	0.000000	1.281	-1.209000	0.009702
3	Z-punto1	0.000000	1.281	-0.607000	0.003589
4	Z+punto4	0.000000	1.281	2.394000	0.008098
5	Z+punto3	0.000000	1.281	1.800000	0.005586
6	Z+punto2	0.000000	1.281	1.205000	0.003892
7	Z+punto1	0.000000	1.281	0.600000	0.003633
8	X-punto2	-1.008000	1.281	0.000000	0.011550
9	X-punto1	-0.406000	1.281	0.000000	0.006207
10	X+punto3	2.006000	1.281	0.000000	0.007757
11	X+punto2	1.406000	1.281	0.000000	0.003768
12	X+punto1	0.803000	1.281	0.000000	0.004317
13	centro	0.000000	1.281	0.000000	0.007291
14	cd4-punto2	1.714734	1.281	-1.714734	0.012076
15	cd4-punto1	1.004799	1.281	-1.004799	0.003920
16	cd3-punto2	-1.808072	1.281	-1.808072	0.007695
17	cd3-punto1	-1.002677	1.281	-1.002677	0.007211
18	cd1-punto1	1.004799	1.281	1.004799	0.003324
19	cd1-punto2	1.805951	1.281	1.805951	0.010848
20	cd2-punto1	-1.001263	1.281	1.001263	0.009911
21	cd2-punto2	-1.708370	1.281	1.708370	0.093215
22	Z-punto4	0.000000	1.281	-2.410000	0.010472

	Marcador	X (m)	Y(m)	Z(m)	MAE-posición-marcador (m)
0	Z-punto4	0.000000	1.718	-2.410000	0.010189
1	Z-punto3	0.000000	1.718	-1.811000	0.006718
2	Z-punto2	0.000000	1.718	-1.209000	0.012283
3	Z-punto1	0.000000	1.718	-0.607000	0.004836
4	Z+punto4	0.000000	1.718	2.394000	0.011147
5	Z+punto3	0.000000	1.718	1.800000	0.008403
6	Z+punto2	0.000000	1.718	1.205000	0.005385
7	Z+punto1	0.000000	1.718	0.600000	0.008011
8	X-punto2	-1.008000	1.718	0.000000	0.015744
9	X-punto1	-0.406000	1.718	0.000000	0.007969
10	X+punto3	2.006000	1.718	0.000000	0.012638
11	X+punto2	1.406000	1.718	0.000000	0.005836
12	X+punto1	0.803000	1.718	0.000000	0.005718
13	centro	0.000000	1.718	0.000000	0.006560
14	cd4-punto2	1.714734	1.718	-1.714734	0.013405
15	cd4-punto1	1.004799	1.718	-1.004799	0.004926
16	cd3-punto2	-1.808072	1.718	-1.808072	0.014310
17	cd3-punto1	-1.002677	1.718	-1.002677	0.014009
18	cd1-punto1	1.004799	1.718	1.004799	0.008681
19	cd1-punto2	1.805951	1.718	1.805951	0.010422
20	cd2-punto1	-1.001263	1.718	1.001263	0.016727
21	X-punto3	-1.611000	1.718	0.000000	0.031286

	Marcador	X (m)	Y(m)	Z(m)	MAE-posición-marcador (m)
0	Z-punto4	0.000000	1.984	-2.410000	0.012314
1	Z-punto3	0.000000	1.984	-1.811000	0.009104
2	Z-punto2	0.000000	1.984	-1.209000	0.014323
3	Z-punto1	0.000000	1.984	-0.607000	0.006391
4	Z+punto4	0.000000	1.984	2.394000	0.012621
5	Z+punto3	0.000000	1.984	1.800000	0.009868
6	Z+punto2	0.000000	1.984	1.205000	0.006892
7	Z+punto1	0.000000	1.984	0.600000	0.009907
8	X-punto2	-1.008000	1.984	0.000000	0.018605
9	X-punto1	-0.406000	1.984	0.000000	0.007777
10	X+punto2	1.406000	1.984	0.000000	0.007449
11	X+punto1	0.803000	1.984	0.000000	0.006272
12	centro	0.000000	1.984	0.000000	0.007876
13	cd4-punto2	1.714734	1.984	-1.714734	0.013879
14	cd4-punto1	1.004799	1.984	-1.004799	0.002417
15	cd3-punto2	-1.808072	1.984	-1.808072	0.015978
16	cd3-punto1	-1.002677	1.984	-1.002677	0.017320
17	cd1-punto1	1.004799	1.984	1.004799	0.010246
18	cd1-punto2	1.805951	1.984	1.805951	0.010680
19	cd2-punto1	-1.001263	1.984	1.001263	0.019612

Durante el desarrollo del proyecto, nos enfrentamos a diversos desafíos que influyeron en el proceso y requerían soluciones adaptativas.

Valor con signo cambiado en el eje Z

Una de las consideraciones que cabe tomar en cuenta es que al exportar el CSV de los videos el valor de los marcadores capturados en el eje Z cambian de signo. Esta inconsistencia afectó en el cálculo de la precisión de los datos capturados, por lo que se optó por cambiar el signo en ambos ejes (positivo y negativo) para corregirlo y garantizar la fiabilidad de los resultados.

Suelo del laboratorio irregular

Las baldosas no están bien adheridas al suelo del laboratorio del CTI, lo que genera una ligera elevación en ciertas áreas del piso.

La disposición de un piso chueco en el entorno de captura impactó en la alineación de las cámaras infrarrojas. Este factor inesperado generó distorsiones en la percepción espacial, complicando la interpretación precisa de los movimientos registrados.

Limitaciones del sistema operativo para las cámaras

La deficiencia del sistema operativo utilizado inicialmente no satisfacía los requerimientos de las cámaras, como se había comentado antes, se usan 21 cámaras infrarrojas para la captura de movimiento, el sistema operativo usado tenía problemas para mantener encendidas todas, lo que afectó la estabilidad y el rendimiento del sistema de captura. Fue necesario mejorar los recursos y se cambió la laptop por una computadora de escritorio para asegurar una integración efectiva y mejorar el rendimiento.

Utilización de extensiones de USB

Dado que en un inicio se usó una laptop, esta no contaba con suficientes puertos USB para conectar las cámaras usadas por el sistema, por lo que se usaban extensiones de USB para tener los suficientes puertos, esto pudo haber sido un factor que influyó en el apagado repentino de ciertas cámaras al usar el sistema.

Configuración y versión del software Motive

El sistema de cámaras se basó en la versión 1.5 del software Motive. Esta elección planteó ciertas limitaciones en la extracción de datos, ya que en algunos archivos generados se incluía información superflua como falsos marcadores o datos nulos. La depuración

de esta información redundante implicó un proceso adicional de limpieza para obtener resultados precisos y relevantes.

Este proceso se realizó con la librería Pandas de Python, y aunque se obtuvo la precisión de manera eficiente, se debe tomar en cuenta que en caso de trabajar en un futuro con una versión mas actualizada de Motive, este podría tener una estructura diferente en el CSV que entrega con la información del video.