



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE BIOMEDICINA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO PARA
ANÁLISIS BIOMECÁNICO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de:

Ingeniero Biomédico

AUTOR: STEVEN ALEXANDER TEJADA PORTILLA

TUTOR: MICAELA NATALY VILLA ROSERO

Quito - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Steven Alexander Tejada Portilla con documento de identificación N° 1751530278 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 09 de febrero del año 2026

Atentamente,



Steven Alexander Tejada Portilla
1751530278

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Steven Alexander Tejada Portilla con documento de identificación No. 1751530278 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo Experimental: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO ABIERTO PARA ANÁLISIS MECÁNICO”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Biomédico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 09 de febrero del año 2026

Atentamente,



Steven Alexander Tejada Portilla
1751530278

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Micaela Nataly Villa Rosero con documento de identificación N°0302002977 docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO ABIERTO PARA ANÁLISIS MECÁNICO”, realizado por Steven Alexander Tejada Portilla con documento de identificación N° 1751530278, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajos Experimentales que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 09 de febrero del año 2026

Atentamente,



Micaela Nataly Villa Rosero
0302002977

Dedicatoria

A mis padres, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por apoyarme incondicionalmente, por creer en mí y por darme la oportunidad de alcanzar este sueño. Este logro también es suyo. A mi familia y amigos, por acompañarme en cada etapa, por sus palabras de aliento, por su comprensión en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada pequeño avance. Y, por supuesto, a mi querido perro Capitán, mi mejor amigo y compañero fiel, por su cariño incondicional, por hacer mis días más felices y por no separarse nunca de mí.

Agradecimientos

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a la Ing. Micaela Nataly Villa Rosero, tutora de este trabajo de titulación, por su acompañamiento académico, orientación técnica y disposición permanente durante el desarrollo de la presente investigación.

Agradezco de manera especial a Adriana Muñoz por su colaboración durante las sesiones de captura de movimiento, así como por su apoyo en las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio, contribuyendo de forma directa a la obtención de los datos utilizados en este estudio.

Asimismo, expreso mi agradecimiento al equipo del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, por facilitar el acceso a las cámaras OptiTrack, la mesa de calibración y los recursos técnicos necesarios para la realización de las pruebas experimentales, sin los cuales este trabajo no habría sido posible.

Finalmente, agradezco a mi familia y a las personas que me brindaron apoyo y motivación a lo largo de este proceso académico, acompañándome durante las distintas etapas del desarrollo de este trabajo.

Resumen

Este trabajo desarrolla un sistema abierto de captura de movimiento basado en cámaras OptiTrack Flex 3, con el objetivo de reducir la dependencia de software propietario y habilitar un flujo de trabajo accesible, reproducible y verificable. El estudio se ejecutó en un entorno controlado del Campus Girón mediante una metodología cuantitativa-experimental, organizada en módulos: (i) comunicación de bajo nivel con el *Camera SDK* y compilación de funciones MEX para inicializar el SDK, detectar cámaras y adquirir imágenes infrarrojas sincronizadas; (ii) adquisición y evaluación de marcadores reflectivos, identificando limitaciones por vestimenta, reflejos y oclusiones; (iii) calibración intrínseca; (iv) estimación y validación de parámetros extrínsecos para unificar el sistema multicámara en un marco común definido por el tablero; y (v) reconstrucción 3D por triangulación e implementación de módulos de medición (2D/3D) para estimar ángulos articulares a partir de tres marcadores. En la fase de pruebas se observó que la reconstrucción 3D puede degradarse cuando la calibración extrínseca se limita a un plano (p. ej., tablero sobre mesa), por lo que se implementó una validación complementaria en 2D: estimación angular con referencia de goniómetro y pruebas adicionales para medición de distancias relativas tras una calibración experimental en el plano. Los resultados preliminares confirman la viabilidad técnica del sistema para adquisición IR, detección de marcadores y reconstrucción geométrica bajo condiciones de calibración adecuadas, y establecen una base sólida para futuras validaciones de precisión y estandarización de exportación de datos hacia entornos como MATLAB.

Palabras clave: captura de movimiento, OptiTrack Flex 3, *Camera SDK*, calibración multicámara, reconstrucción 3D, triangulación, marcadores reflectivos, validación 2D, MATLAB.

Abstract

This work presents the development of an open motion capture system based on OptiTrack Flex 3 cameras, aiming to reduce proprietary software dependency through an accessible, reproducible, and verifiable workflow. The study was conducted in a controlled environment at the Girón Campus under a quantitative–experimental approach structured into modules: (i) low-level camera communication using the Camera SDK and MEX compilation to initialize the SDK, detect devices, and acquire synchronized infrared frames; (ii) reflective-marker acquisition and assessment, identifying practical limitations due to clothing, specular reflections, and occlusions; (iii) intrinsic calibration; (iv) extrinsic parameter estimation and validation to unify the multicamera setup into a common reference frame defined by the calibration board; and (v) 3D reconstruction via triangulation and implementation of measurement modules (2D/3D) to estimate joint angles from three markers. During testing, 3D reconstruction performance was observed to degrade when extrinsic calibration was constrained to a nearly planar motion of the board (e.g., board placed on a table); therefore, a complementary 2D validation strategy was implemented, including angle estimation using a goniometer reference and additional trials for relative distance measurement after planar experimental scale calibration. Preliminary results confirm the technical feasibility of the proposed system for IR acquisition, marker detection, and geometric reconstruction under proper calibration, and provide a solid foundation for future accuracy validation and standardized data export toward environments such as MATLAB.

Keywords: motion capture, OptiTrack Flex 3, Camera SDK, multicamera calibration, 3D reconstruction, triangulation, reflective markers, 2D validation, MATLAB.

Contenido

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Lista de símbolos y abreviaturas	xv
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Alcances y limitaciones	4
1.4.1 Alcances	4
1.4.2 Limitaciones	5
2 Marco Teórico	6
2.1 Sistemas de captura de movimiento (MoCap)	6
2.1.1 Clasificación de tecnologías	6
2.1.2 Sistemas ópticos basados en marcadores	7
2.1.3 Sistemas inerciales (IMU)	7
2.1.4 Sistemas <i>markerless</i>	7
2.2 Calibración multicámara	7
2.2.1 Métodos de calibración y refinamiento	8
2.2.2 Condicionamiento geométrico del patrón	8
2.3 Reconstrucción tridimensional y estabilización	8
2.3.1 Filtrado e interpolación	8
2.4 Validación experimental y métricas de error	9
2.5 Interoperabilidad y sistemas abiertos	9
2.6 Relación con la propuesta metodológica	9
3 Metodología	10
3.1 Habilitación de adquisición de bajo nivel (C++/MEX)	11
3.2 Adquisición IR multi-cámara y verificación de observabilidad	14

3.3	Procesamiento 2D y estimación angular por cámara	15
3.4	Calibración geométrica (intrínseca y extrínseca) y criterios de calidad	16
3.5	Reconstrucción 3D y estimación angular (cuando es geoméricamente viable)	19
3.6	Proyección al plano 2D	21
3.6.1	Calibración y validación de distancias en 2D	22
3.6.2	Pruebas con sujeto colaborador y registro de referencia	24
3.7	Ciclo de datos y trazabilidad de entradas/salidas	25
4	Resultados	26
4.1	Resultados y discusión	26
4.1.1	Estimación de ángulos articulares	26
4.1.2	Medición de distancias entre marcadores	27
4.1.3	Interpretación global de los resultados	27
4.1.4	Limitaciones del estudio	28
5	Conclusiones y recomendaciones	30
5.1	Conclusiones	30
5.2	Recomendaciones	31
	Bibliografía	32

Lista de símbolos y abreviaturas

Esta sección presenta los símbolos y abreviaturas utilizados a lo largo del documento.

Símbolos

Símbolo	Descripción
X, Y, Z	Ejes del sistema de coordenadas (espacial).
θ	Ángulo articular estimado (grados).
d	Distancia entre marcadores (m o cm, según el caso).
Δ	Diferencia entre valor estimado y valor de referencia.
\pm	Variación respecto a un valor promedio.
px	Unidad de píxel usada en el plano de imagen.

Abreviaturas

Abreviatura	Significado
IR	Infrarrojo (<i>Infrared</i>).
SDK	Kit de desarrollo de software (<i>Software Development Kit</i>).
MEX	Archivo compilado de MATLAB para ejecutar código C/C++.
MSVC	Microsoft Visual C++ (compilador).
DoF	Grados de libertad (<i>Degrees of Freedom</i>).
Cam	Cámara (Cam 1, Cam 2, etc.).

1 Introducción

El análisis del movimiento humano constituye una parte indispensable dentro de la biomedicina, la biomecánica, la rehabilitación y el análisis del rendimiento físico, especialmente en entornos académicos donde se requiere cuantificar variables cinemáticas para evaluación biomecánica. En el contexto de las prácticas y pruebas realizadas con sistemas ópticos de captura de movimiento, se evidencia la necesidad de contar con un flujo de trabajo reproducible y adaptable para la adquisición y el procesamiento de datos, dado que el objetivo no es únicamente registrar el movimiento, sino también integrarlo con herramientas de análisis científico y procesamiento personalizado. Entre las tecnologías disponibles, los sistemas ópticos de captura de movimiento han demostrado ser una de las soluciones más precisas debido a la capacidad de adquirir datos de forma espacial y temporal, siendo un referente para investigaciones experimentales y clínicas [16, 23].

Sin embargo, durante el uso de sistemas ópticos comerciales, se identificó que su funcionamiento depende de software propietario que controla la adquisición, calibración y transmisión de datos, lo que limita la escalabilidad del sistema, dificulta la integración con plataformas abiertas y restringe la personalización del flujo de trabajo para investigaciones avanzadas [19, 20]. Debido a esta dependencia se reduce el acceso directo a los datos crudos generados por cámaras ópticas de uso extendido, como las OptiTrack Flex3, impidiendo desarrollar e integrar de manera transparente módulos propios de comunicación, reconstrucción tridimensional, etiquetado de marcadores y filtrado de ruido sin recurrir a plataformas cerradas.

En paralelo, diversas investigaciones han explorado alternativas basadas en sensores inerciales, modelos de estimación sin marcadores y cámaras RGB con algoritmos de *pose estimation*. Si bien estos métodos ofrecen ventajas como portabilidad y bajo costo, los estudios comparativos evidencian que presentan mayores desviaciones angulares, pérdida de estabilidad en mediciones prolongadas y menor precisión en la estimación tridimensional del movimiento [9, 13]. Asimismo, trabajos recientes sugieren que, aunque el hardware óptico mantiene su liderazgo en exactitud, la dependencia del software propietario continúa siendo una de las principales limitantes para su uso en entornos académicos y de investigación abierta [5, 12, 14].

A pesar de la relevancia de estos desarrollos, aún existe una escasez de propuestas que permitan acceder directamente a los datos crudos generados por cámaras ópticas de uso extendido, como las OptiTrack Flex3. Este vacío impide la creación de sistemas abiertos que integren módulos de comunicación, reconstrucción tridimensional, etiquetado de marcadores, filtrado de ruido y análisis biomecánico sin necesidad de plataformas con software propieta-

rio. Asimismo, limita la reproducibilidad de experimentos, la comparación entre diferentes tecnologías y la adaptación de configuraciones para estudios que requieren independencia metodológica o bajo presupuesto.

En este marco, adquirir un entendimiento integral de los sistemas ópticos y de sus limitaciones prácticas resulta indispensable para el diseño de plataformas abiertas que permitan reemplazar, complementar o extender las funciones que actualmente dependen exclusivamente de software comercial. Los estudios sobre estabilidad volumétrica, error sistemático, sensibilidad a la iluminación, distancia inter-cámaras y configuración geométrica del arreglo óptico muestran que la precisión del sistema depende tanto del hardware como de las metodologías implementadas durante la calibración y el procesamiento de datos [12, 16]. Estas observaciones refuerzan la necesidad de contar con herramientas de código abierto que permitan ejecutar dichos procedimientos de manera replicable.

A partir de esta problemática, el presente trabajo se enmarca en el desarrollo de un sistema abierto de captura de movimiento basado en cámaras OptiTrack Flex3, orientado a la obtención, gestión y análisis de datos tridimensionales sin la intervención de software propietario. Para ello, se plantea un enfoque metodológico que integra la comunicación directa con las cámaras mediante SDKs abiertos, la adquisición de imágenes infrarrojas para reconstrucción independiente, la implementación de algoritmos de detección y seguimiento de marcadores, la generación de trayectorias tridimensionales y su posterior transferencia a entornos de análisis biomecánico.

Esta metodología busca garantizar la adaptabilidad del sistema a diferentes espacios experimentales y permitir el desarrollo de herramientas de análisis en ingeniería, ciencias del deporte y biomecánica computacional. Asimismo, se pretende demostrar que es posible reproducir funciones clave de plataformas comerciales, como Motive, mediante la integración técnica de librerías abiertas, lenguajes científicos y procedimientos rigurosos de calibración. El alcance del presente estudio incluye la validación inicial del sistema en condiciones controladas, la caracterización del error tridimensional obtenido mediante la reconstrucción con múltiples cámaras y la comparación teórica con los valores de referencia de la literatura. Entre las limitaciones se reconoce que la disponibilidad de hardware está restringida al modelo Flex3 y que el sistema debe operar bajo condiciones óptimas de iluminación infrarroja para mantener la calidad de los registros.

Finalmente, este trabajo adquiere relevancia para el avance del campo debido a que propone una alternativa abierta y accesible para laboratorios académicos, investigadores independientes y grupos de desarrollo tecnológico. Al eliminar las barreras impuestas por el software propietario, se contribuye a ampliar las posibilidades de investigación, facilitar la replicación de estudios y promover el desarrollo de métodos biomecánicos basados en principios de ciencia abierta. La implementación de este sistema tiene aplicación directa en análisis de marcha, evaluación ergonómica, estudios deportivos, validación de modelos biomecánicos y prototipado de herramientas digitales para captura y procesamiento tridimensional del movimiento humano.

1.1. Planteamiento del problema

El análisis biomecánico de la marcha requiere sistemas de captura de movimiento capaces de registrar con alta precisión las trayectorias espaciales de los marcadores y articulaciones humanas. Sin embargo, los sistemas comerciales disponibles dependen de licencias propietarias para su funcionamiento integral, limitando el acceso a herramientas avanzadas de procesamiento y restringiendo la posibilidad de implementar entornos de análisis abiertos y adaptables a distintas configuraciones experimentales [18, 20].

Los sistemas ópticos actuales emplean múltiples cámaras infrarrojas distribuidas alrededor del espacio de medición para reconstruir coordenadas tridimensionales mediante el registro de marcadores retroreflectivos [16]. Este proceso requiere una calibración constante, ya que la variación en la posición de las cámaras, la iluminación ambiental o la distancia entre dispositivos afecta directamente la precisión del registro [12, 22]. Además, la dependencia de software propietario condiciona el procesamiento y exportación de los datos, limitando entornos académicos donde el acceso a licencias completas no siempre es viable.

El procesamiento de los datos capturados se ve afectado por la necesidad de realizar transformaciones, filtrados y conversiones de formato para integrarlos en plataformas científicas como *MATLAB*. Aunque existen complementos oficiales que permiten la comunicación entre Motive y *MATLAB* mediante el protocolo NatNet, su uso requiere entornos cerrados y configuraciones específicas [19, 20]. La falta de herramientas abiertas que posibiliten la recepción directa de datos tridimensionales dificulta la implementación de soluciones experimentales enfocadas en la marcha humana.

En la práctica, las variaciones en la calibración, los errores de alineamiento entre cámaras y la interferencia de la luz infrarroja reducen la exactitud del sistema y generan fluctuaciones en las coordenadas de los marcadores [16, 18]. Asimismo, el registro simultáneo de varios marcadores demanda un control riguroso del tiempo de captura y sincronización de las cámaras, pues pequeñas alteraciones entre los fotogramas afectan la reconstrucción del movimiento [15]. Estas limitaciones dificultan el desarrollo de sistemas abiertos que puedan integrarse sin depender de herramientas de software comerciales.

Por otra parte, el interés creciente en realizar análisis de marcha en entornos académicos y de investigación aplicada impulsa la necesidad de diseñar sistemas de captura de movimiento más accesibles y reproducibles. Los estudios recientes evidencian que es posible lograr precisiones submilimétricas mediante calibraciones adecuadas y procesamiento de señales, incluso empleando configuraciones de bajo costo o parcialmente abiertas [4, 9]. No obstante, persiste la necesidad de establecer procedimientos estandarizados para la conexión, detección de marcadores y transmisión de datos a entornos de análisis abiertos como *MATLAB*, garantizando así la precisión y estabilidad requeridas para el estudio de la marcha humana.

1.2. Justificación

La importancia del presente trabajo radica en el desarrollo de herramientas de software de código abierto para el procesamiento y análisis de datos de un sistema de captura de movimiento de referencia. Este sistema será también la base necesaria para la validación experimental de sistemas de captura de movimiento de bajo costo. Centrada en la capacidad de desarrollar funciones personalizadas en plataformas para realizar tareas clave como la conexión y adquisición de datos, la clasificación, la generación de gráficos, el filtrado para reducir el ruido de alta frecuencia, y la aplicación de técnicas de interpolación para gestionar datos faltantes.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de software de captura de movimiento abierto para análisis de marcha.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar la interfaz de comunicación de bajo nivel entre un entorno de desarrollo y las cámaras OptiTrack Flex 3.
- Desarrollar los módulos de calibración volumétrica y reconstrucción 3D mediante el uso de librerías.
- Generar un protocolo de exportación de datos utilizable en el análisis biomecánico.

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcances

Los alcances de este trabajo son estrictamente técnicos y se limitan al entorno de laboratorio, sin contemplar la realización de estudios clínicos. El objetivo principal es construir una plataforma de software alternativa capaz de gestionar el ciclo del dato que incluye la captura y la visualización en tiempo real. Se plantea que el software desarrollado está destinado a ser la base para futuros estudios de validación técnica, enfocados en determinar la precisión y exactitud del sistema y cuantificar los errores de medición.

1.4.2. Limitaciones

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

Espacial o geográfica

El trabajo de titulación tiene carácter experimental y cuantitativa, la delimitación espacial cubre las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Girón que incluyen los siguientes recursos: laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación, biblioteca de la universidad y acceso a documentos en línea que contengan información relevante para el estudio, así también se puede considerar la colaboración de expertos externos.

Temporal

El presente trabajo de titulación será realizado en un periodo de 240 horas, lo que equivale aproximadamente a 3 meses de trabajo.

Sectorial o institucional

Dado que el enfoque principal de este proyecto es de tipo cuantitativo y experimental, el trabajo de titulación presentado se realizará dentro de las instalaciones pertenecientes a la Universidad Politécnica Salesiana Campus Girón, considerando el espacio del laboratorio de Ingeniería en Rehabilitación.

2 Marco Teórico

El análisis biomecánico del movimiento humano es un componente central en rehabilitación, deporte, ergonomía e investigación clínica. Para cuantificar el movimiento se emplean sistemas de captura capaces de registrar trayectorias y orientaciones con resolución espacio-temporal suficiente para estimar variables cinemáticas (p. ej., ángulos articulares). Este capítulo sintetiza los fundamentos que sustentan la captura de movimiento moderna, con énfasis en: (i) tecnologías MoCap (ópticas, inerciales y *markerless*), (ii) calibración multicámara, (iii) reconstrucción 3D y filtrado, (iv) validación experimental, e (v) interoperabilidad y motivación de plataformas abiertas [16, 17, 18, 19, 20, 23].

2.1. Sistemas de captura de movimiento (MoCap)

Los sistemas de captura de movimiento (*Motion Capture*, MoCap) estiman variables del movimiento humano a partir de mediciones sincronizadas provenientes de cámaras, sensores inerciales o visión computacional. En términos generales, la confiabilidad depende de la calidad del hardware, la geometría de adquisición, la sincronización y los métodos de calibración y procesamiento [5, 12, 16].

2.1.1. Clasificación de tecnologías

De forma práctica, la captura de movimiento se organiza en tres familias tecnológicas:

- **Ópticos con marcadores:** cámaras (comúnmente IR) + marcadores pasivos/activos; reconstrucción por triangulación [16].
- **Inerciales (IMU):** acelerómetro, giróscopo y magnetómetro; estimación orientacional y cinemática por fusión sensorial [9].
- **Markerless:** detección de puntos clave con visión por computadora y redes profundas; reconstrucción 2D/3D sin marcadores [3, 26].

Cada familia presenta compromisos entre precisión, portabilidad, costo y complejidad operativa [1].

2.1.2. Sistemas ópticos basados en marcadores

Los sistemas ópticos basados en marcadores se consideran referencia en biomecánica experimental por su exactitud y repetibilidad bajo calibración controlada. En estos sistemas, los marcadores retroreflectivos se observan como regiones de alta intensidad en imágenes IR y su posición 3D se obtiene por triangulación multivista [5, 16]. Reportes metrológicos muestran errores muy reducidos cuando el volumen está bien instrumentado y la calibración es de alta calidad [23].

La arquitectura típica incluye cámaras sincronizadas, marcadores y software para calibración, reconstrucción y exportación. La disposición geométrica de cámaras alrededor del volumen de captura es crítica para minimizar oclusiones y mejorar condición de triangulación [12, 22]. Las limitaciones recurrentes incluyen infraestructura especializada, sensibilidad a interferencia IR, pérdida de marcadores por oclusión y dependencia de flujos propietarios para acceder a datos crudos. Estas restricciones motivan pipelines abiertos donde el control del dato (desde adquisición a exportación) sea verificable y reproducible [17, 18, 19, 20].

2.1.3. Sistemas inerciales (IMU)

Las IMU emplean fusión de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros para estimar orientación y, de forma indirecta, cinemática articular. Su ventaja principal es la portabilidad (uso fuera de laboratorio). No obstante, los errores por deriva, integración y alineamiento inicial pueden acumularse, especialmente en movimientos prolongados o dinámicos [2, 21]. Comparaciones con referencia óptica han encontrado discrepancias mayores en articulaciones como pelvis/cadera, lo que limita su sustitución directa cuando se requiere alta exactitud [9, 24].

2.1.4. Sistemas markerless

Los enfoques *markerless* eliminan marcadores físicos y estiman la postura a partir de imágenes (RGB/RGB-D) mediante redes convolucionales entrenadas para detectar puntos clave [3, 26]. En configuraciones multivista, estimaciones 2D pueden triangulares para obtener reconstrucción 3D [7]. Sin embargo, en validaciones se reportan errores angulares que pueden superar 9–10° en articulaciones como codo y hombro, especialmente con oclusiones y movimientos rápidos [8, 14]. Por ello, aunque son operativamente atractivos, aún presentan brechas frente a sistemas ópticos con marcadores en aplicaciones de alta precisión [6].

2.2. Calibración multicámara

La calibración multicámara es el proceso que garantiza coherencia geométrica entre cámaras y habilita reconstrucción 3D consistente. Se divide en:

- **Intrínsecos:** distancia focal, punto principal y distorsión.
- **Extrínsecos:** rotación y traslación de cada cámara respecto a un marco global.

En sistemas multivista, la precisión final queda directamente condicionada por la calidad de estos parámetros [13, 16].

2.2.1. Métodos de calibración y refinamiento

Los métodos clásicos emplean patrones (tableros) o varillas; enfoques recientes combinan instrumentos activos y refinan la solución con *bundle adjustment* para minimizar error re-proyectado y mejorar coherencia global del volumen [11, 15]. Adicionalmente, restricciones geométricas pueden reducir sobreajuste y estabilizar la solución en volúmenes extensos [13, 15].

2.2.2. Condicionamiento geométrico del patrón

Para una calibración extrínseca robusta, el patrón debe excitar el espacio 3D (variaciones de orientación y profundidad). Cuando el patrón queda restringido a un plano casi fijo, la solución puede degradarse en el eje de profundidad, afectando reconstrucción métrica y, por extensión, variables que dependan de 3D (p. ej., longitudes absolutas) [11, 15]. Este fundamento es relevante para justificar la necesidad de protocolos de captura del patrón con diversidad de poses.

2.3. Reconstrucción tridimensional y estabilización

Con cámaras calibradas, la reconstrucción 3D se realiza mediante triangulación a partir de correspondencias 2D observadas en dos o más cámaras. La exactitud depende de la geometría multicámara, la sincronización y la estabilidad de la detección 2D. En adquisición real, la oclusión es un fenómeno frecuente; por ello, pipelines robustos deben tolerar pérdida parcial de vistas y operar con subconjuntos de cámaras siempre que exista información suficiente para reconstrucción estable [13, 16].

2.3.1. Filtrado e interpolación

Las trayectorias reconstruidas contienen ruido asociado a detección, discretización temporal y errores residuales de calibración. Por esta razón, se emplean filtros pasa-bajos (p. ej., Butterworth) o enfoques probabilísticos (p. ej., Kalman extendido) para estabilizar trayectorias antes de cálculo biomecánico. En sistemas abiertos, el filtrado es una etapa clave porque reemplaza funciones encapsuladas en plataformas propietarias y permite trazabilidad del procesamiento [13, 15].

2.4. Validación experimental y métricas de error

La validación de MoCap suele apoyarse en comparación con referencias (p. ej., sistemas ópticos comerciales o instrumentos metrológicos) y en métricas como RMSE, error medio, varianza e índices de correlación. Estudios comparativos muestran que los sistemas ópticos con marcadores mantienen menor incertidumbre, mientras que IMU y *markerless* presentan errores mayores y dependientes del tipo de movimiento. En validaciones metrológicas de sistemas ópticos se han utilizado referencias de alta exactitud para cuantificar repetibilidad y exactitud del volumen de captura [6, 16, 21, 23].

2.5. Interoperabilidad y sistemas abiertos

Un requisito contemporáneo en MoCap es la interoperabilidad: transmisión y consumo de datos en entornos externos (p. ej., MATLAB) para análisis, filtrado y visualización. En plataformas OptiTrack, los SDKs (NatNet y Camera SDK) soportan integración con software externo y habilitan arquitecturas desacopladas: el hardware produce datos y un cliente independiente los procesa. Este enfoque es especialmente relevante en sistemas abiertos porque facilita reproducibilidad, validación independiente y control del flujo del dato, reduciendo dependencia de herramientas propietarias [10, 13, 17, 18, 19, 20].

2.6. Relación con la propuesta metodológica

La evidencia del estado del arte indica que la captura óptica basada en marcadores continúa siendo referencia por su precisión bajo calibración controlada [16, 23]. A la vez, se reconoce la necesidad de pipelines abiertos y modularizados (adquisición, calibración, detección 2D, reconstrucción 3D, postproceso y exportación) para asegurar trazabilidad y extensibilidad del flujo. Este marco conceptual sustenta directamente la arquitectura implementada en la tesis y la elección de integrar adquisición de bajo nivel con MATLAB mediante bibliotecas oficiales y funciones MEX [17, 18, 19, 20].

3 Metodología

La metodología de este trabajo se estructuró como un procedimiento de ingeniería orientado a implementar y validar un flujo abierto de captura de movimiento basado en visión infrarroja con cámaras OptiTrack Flex 3.

La solución propuesta consiste en un *pipeline* modular (hardware–software) que captura imágenes IR sincronizadas desde múltiples cámaras, calibra la geometría multi-vista mediante un tablero patrón, detecta marcadores reflectivos en 2D, reconstruye su posición 3D cuando las condiciones lo permiten, y finalmente estima ángulos articulares en 2D/3D y genera salidas de análisis en MATLAB. El flujo está diseñado para ser reproducible y extensible, apoyándose en comunicación de bajo nivel con el *Camera SDK* mediante MEX, en calibración intrínseca/extrínseca basada en tablero, y en módulos independientes de detección y reconstrucción [17, 19, 20]. En la Figura 3-1 se presenta el flujo general y en la Figura 3-2 se resume la arquitectura lógica con sus módulos y sus interacciones.

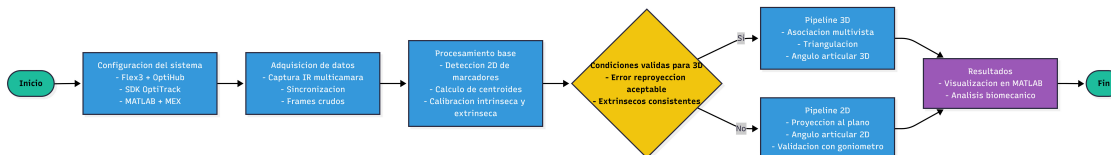


Figura 3-1: Diagrama general del flujo de adquisición, calibración, procesamiento y estimación angular de la solución propuesta.

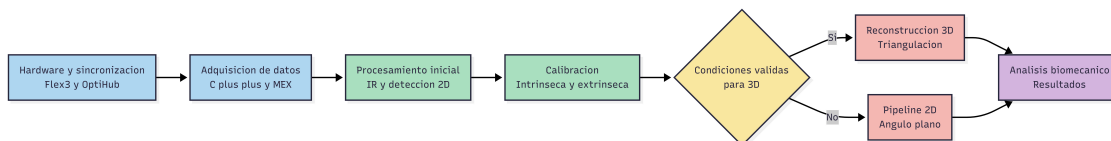


Figura 3-2: Arquitectura lógica del flujo de captura y procesamiento, indicando módulos hardware y software, así como sus entradas, salidas e interacciones.

Para implementar el flujo propuesto se utilizaron los siguientes elementos, organizados en componentes físicos y recursos de software. La selección responde a la necesidad de captura multi-cámara sincronizada, calibración geométrica y procesamiento computacional en MATLAB.

- Plataforma OptiTrack para captura óptica:
 - Cámaras OptiTrack Flex 3.
 - Concentrador OptiHub para sincronización y alimentación.
 - Soportes y trípodes ajustables para fijación y orientación.
- Marcadores esféricos reflectivos pasivos para seguimiento de puntos anatómicos.
- Computador personal con procesador Intel Core i7 y 16 GB de memoria RAM.
- Patrón de calibración tipo tablero de ajedrez de 8×8 casillas, con cuadrados de $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$.
- Goniómetro manual para verificación experimental del ángulo articular.
- Recursos de software:
 - *Camera SDK* de OptiTrack (*CameraLibrary*).
 - MATLAB con soporte para compilación MEX y funciones de calibración (`detectCheckerboard` y `estimateCameraParameters()`).
 - Compilador C++ MSVC (Visual Studio Community 2022).

3.1. Habilitación de adquisición de bajo nivel (C++/MEX)

El objetivo de esta etapa fue establecer un canal de adquisición independiente de Motive, integrando la librería del fabricante con MATLAB mediante MEX. Esta integración permite obtener *frames* IR por cámara, que constituyen la entrada primaria del *pipeline* de procesamiento.

Para asegurar compatibilidad de compilación MEX, se utilizó *Microsoft Visual Studio Community 2022* con la carga de trabajo *Desarrollo para el escritorio con C++*. La configuración de esta carga de trabajo se presenta en la Figura 3-3, donde se evidencia la disponibilidad del compilador *Microsoft Visual C++ 2022*, compatible con el *Camera SDK*. Posteriormente, MATLAB se configuró para emplear dicho compilador mediante el comando `mex -setup C++`, verificando la correcta integración del entorno de desarrollo.

El *Camera SDK* instala la biblioteca dinámica `CameraLibrary2015x64S.dll` y el archivo `.lib` requerido para el enlace, ubicados en el directorio del fabricante. En la Figura 3-4 se observa la estructura del directorio `lib`. Con el fin de simplificar la carga en tiempo de ejecución, la DLL y los archivos fuente C++ se ubicaron en el directorio de trabajo de MATLAB, como se muestra en la Figura 3-5. Finalmente, se verificó el reconocimiento del hardware por el sistema operativo (cámaras y OptiHub), como se indica en la Figura 3-6.

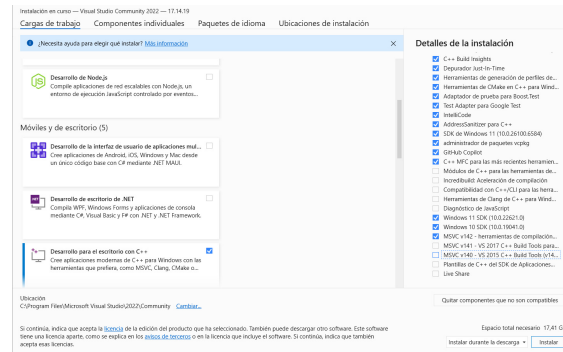


Figura 3-3: Selección de la carga de trabajo *Desarrollo para el escritorio con C++* y componentes MSVC en Visual Studio 2022.

Estas verificaciones reducen fallos por controladores, enumeración USB y disponibilidad del dispositivo.

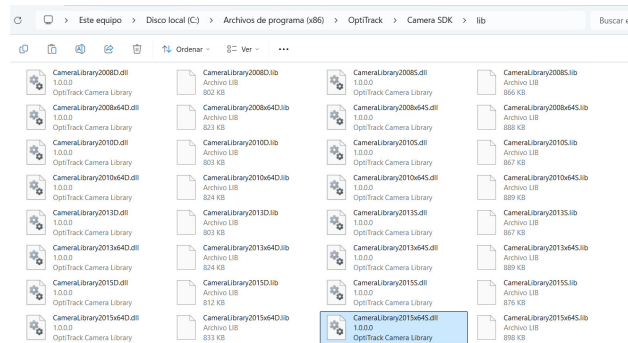


Figura 3-4: Contenido del directorio *lib* del *Camera SDK* con versiones disponibles de *CameraLibrary*.dll* y sus archivos *.lib*.

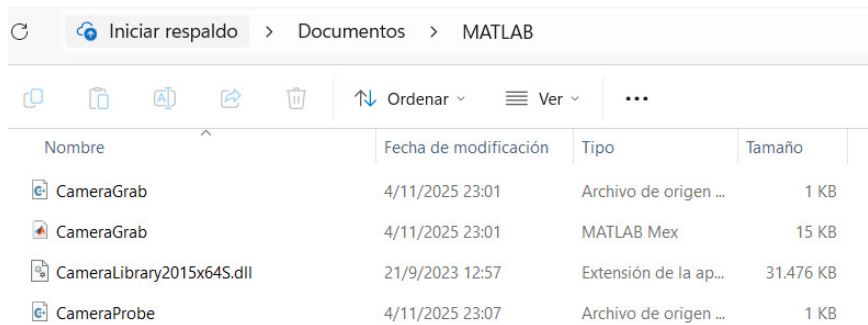


Figura 3-5: Carpeta de trabajo de MATLAB con archivos fuente C++, el MEX compilado y la DLL *CameraLibrary2015x64S.dll*.

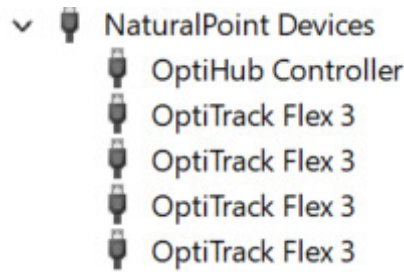


Figura 3-6: Dispositivos reconocidos por el sistema operativo dentro de *NaturalPoint Devices*: OptiHub y cuatro cámaras OptiTrack Flex 3.

Una vez preparado el entorno, se validó la compilación MEX con un módulo mínimo (`CameraGrab.cpp`) destinado a comprobar la cadena MATLAB–MSVC–C++. La evidencia de compilación y ejecución se presenta en la Figura 3-7. Con el flujo validado, se implementó `CameraProbe.cpp`, que inicializa *CameraLibrary* y consulta el número de cámaras disponibles mediante `CameraManager`. En la Figura 3-8 se observa la detección de cámaras desde MATLAB, confirmando que la adquisición puede ser controlada desde el entorno de procesamiento.

```
>> CameraGrab
Compilación MEX correcta. Todo funciona con MinGW-w64.
Todavía no hay cámaras, pero MATLAB ya puede hablar con C++.
>> |
```

Figura 3-7: Compilación y prueba de la función MEX `CameraGrab` para verificar la comunicación básica MATLAB–C++.

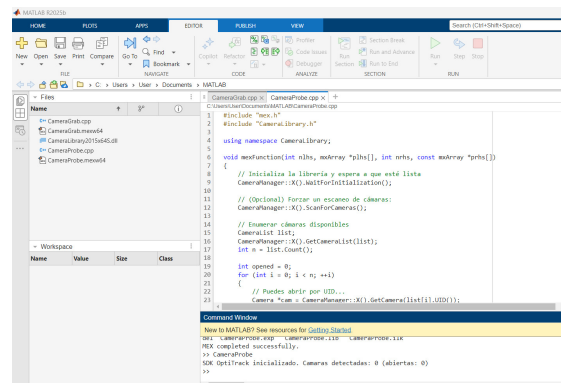


Figura 3-8: Inicialización del SDK de OptiTrack desde MATLAB mediante la función MEX `CameraProbe` y detección del número de cámaras disponibles.

El diagrama lógico del programa principal y sus decisiones se resume en la Figura 3-9, formalizando el flujo de control y evitando que el procedimiento se interprete como una bitácora de eventos.

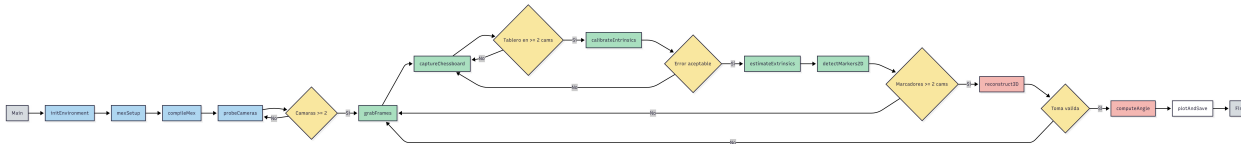


Figura 3-9: Diagrama lógico del programa principal, mostrando el flujo de control, llamadas a funciones y decisiones del proceso.

3.2. Adquisición IR multi-cámara y verificación de observabilidad

El objetivo de esta etapa fue generar datos IR sincronizados (por cámara) y verificar condiciones mínimas de observabilidad para el procesamiento: contraste de marcadores, visibilidad desde múltiples vistas y estabilidad de exposición.

Se implementó `CameraGrabAll()` para capturar simultáneamente *frames* IR de todas las Flex 3 disponibles. La salida de una cámara, utilizada como verificación inicial de saturación y contraste de marcadores, se presenta en la Figura 3-10. La compilación MEX de `CameraGrabAll.cpp` enlazando contra `CameraLibrary2015x64S.lib` se evidencia en la Figura 3-11, garantizando consistencia del compilador configurado previamente. Las cuatro vistas IR adquiridas en forma simultánea se muestran en la Figura 3-12, donde los marcadores aparecen como regiones saturadas, condición adecuada para una segmentación por umbral.

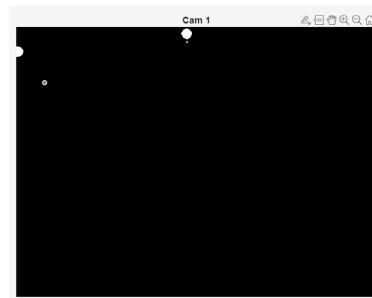


Figura 3-10: Salida IR de una cámara Flex 3 mostrando marcadores reflectivos como puntos brillantes.

```
>> mex -R2018a ...
-I"C:\Program Files (x86)\OptiTrack\Camera SDK\include" ...
"C:\Users\User\Documents\MATLAB\CameraGrabAll.cpp" ...
"C:\Program Files (x86)\OptiTrack\Camera SDK\lib\CameraLibrary2015x64S.lib"
Building with 'Microsoft Visual C++ 2022'
```

Figura 3-11: Compilación de `CameraGrabAll.cpp` como archivo MEX enlazado contra `CameraLibrary2015x64S.lib`.

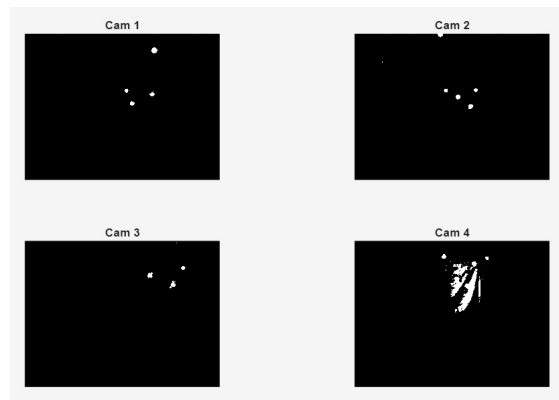


Figura 3-12: Imágenes IR crudas de cuatro cámaras Flex 3 obtenidas con `CameraGrabAll()`, mostrando marcadores como puntos saturados.

3.3. Procesamiento 2D y estimación angular por cámara

El objetivo de esta etapa fue implementar un módulo independiente que, a partir de cada imagen IR, detecte marcadores en 2D y estime el ángulo formado por tres puntos en el plano de imagen. Esta etapa es útil tanto como producto final (validación 2D) como para alimentar la etapa de reconstrucción 3D.

Bajo una configuración de tres marcadores (Fijo, A y B), se calculó el ángulo formado por los segmentos Fijo-A y Fijo-B para cada cámara. Un ejemplo de etiquetado y estimación 2D por vista se presenta en la Figura 3-13. La comparación entre cámaras, usada para analizar sensibilidad a perspectiva y orientar la etapa 3D, se muestra en la Figura 3-14.

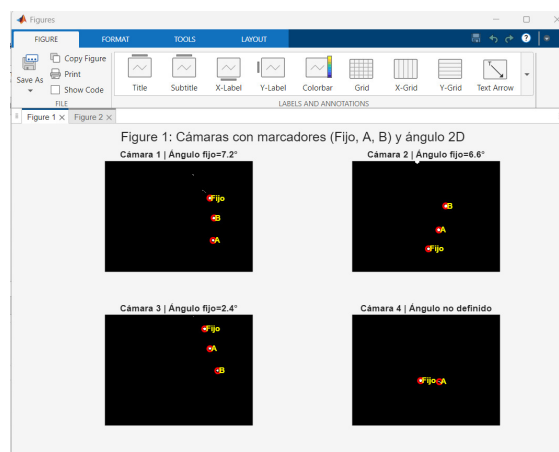


Figura 3-13: Marcadores Fijo, A y B etiquetados y ángulo 2D estimado en cada vista.

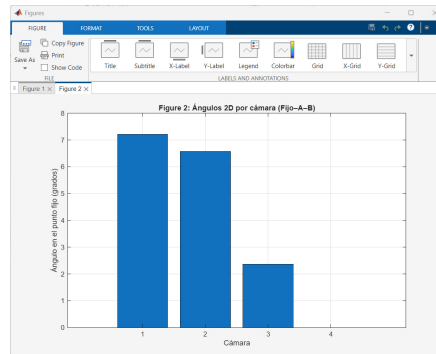


Figura 3-14: Comparación de los ángulos 2D medidos entre marcadores Fijo–A–B para cada cámara.

3.4. Calibración geométrica (intrínseca y extrínseca) y criterios de calidad

El objetivo de esta etapa fue estimar parámetros intrínsecos y extrínsecos para unificar el conjunto de cámaras en un marco común y habilitar la triangulación multi-vista. Esta etapa se formaliza mediante un procedimiento de captura del tablero, detección de esquinas y evaluación de error de reproyección.

Se definió una configuración estable de captura con cuatro cámaras alrededor del tablero, como se observa en la Figura 3-15. Posteriormente, se implementó el script `CaptureChessboard.m` para adquirir múltiples vistas del tablero, según se muestra en la Figura 3-16. La configuración inicial (tablero en piso) se presenta en la Figura 3-17 y un caso de baja visibilidad multi-cámara se muestra en la Figura 3-18. Para aumentar la cobertura visual simultánea, el tablero se elevó sobre una mesa, tal como se evidencia en la Figura 3-19. La detección preliminar y la detección precisa de esquinas mediante `detectCheckerboardPoints()` se muestran en las Figuras 3-20 y 3-21, respectivamente.



Figura 3-15: Configuración del volumen de captura: cuatro cámaras Flex 3 alrededor del tablero de calibración 8×8 en el piso.

3.4 Calibración geométrica (intrínseca y extrínseca) y criterios de calidad

```
16 end
17
18 fprintf('Se guardarán imágenes en: %s\n', outDir);
19 fprintf('Mueve el tablero a distintas posiciones y pulsa ENTER en cada captura.\n');
20
21 for k = 1:numShots
22     % Captura simultánea de todas las cámaras
23     imgs = CameraGrabAll();
24     nCams = numel(imgs);
25
26     if nCams == 0
27         error('CameraGrabAll no devolvió cámaras. ¿Está bien conectado todo?');
28     end
29
30     fprintf('\nToma %d/%d: %d cámaras detectadas.\n', k, numShots, nCams);
31
32     % Guarda una imagen por cámara
33     for c = 1:nCams
34         I = imgs(c);
35         if isempty(I)
36             continue;
37         end
38         fname = sprintf('cam%02d_img%03d.png', c, k);
```

Figura 3-16: Fragmento del script CaptureChessboard.m para captura simultánea de imágenes por cámara.

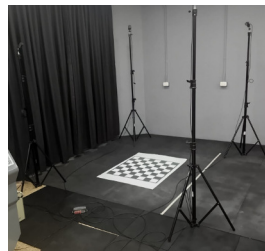


Figura 3-17: Configuración inicial de adquisición: tablero en el suelo y cámaras distribuidas alrededor del volumen de captura.

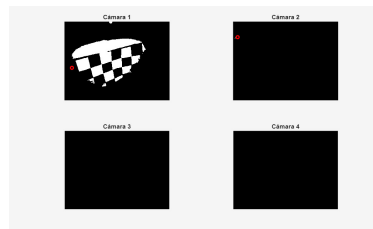


Figura 3-18: Captura inicial desde cuatro cámaras: visibilidad parcial del tablero en una pose.

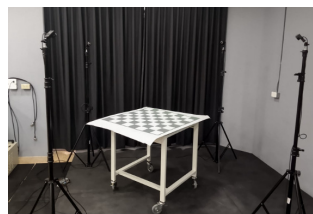


Figura 3-19: Tablero elevado para mejorar cobertura visual simultánea en las cuatro cámaras.

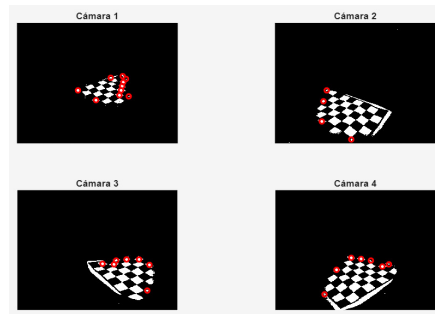


Figura 3-20: Detección preliminar de puntos asociados al tablero durante la adquisición multi-cámara.

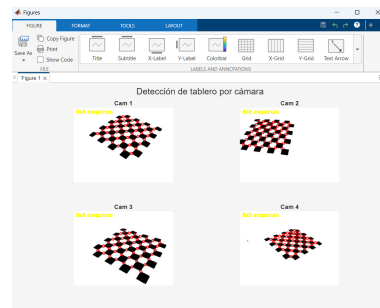


Figura 3-21: Detección automática de esquinas del tablero 8×8 en cada cámara mediante `detectCheckerboardPoints()`.

Con las esquinas detectadas, se estimaron intrínsecas por cámara mediante `estimateCameraParameters()`. La finalización del proceso y la carga de `calib.mat` se presentan en la Figura 3-22. Como criterio de calidad geométrica se utilizó el error medio de reproyección; los valores obtenidos por cámara se muestran en la Figura 3-23, registrando errores menores a 1 px, lo cual valida la consistencia intrínseca para las condiciones experimentales consideradas.

```

Command Window

Calibración completa. Guardado como calib.mat.
>> load calib.mat
paramsCam

for c = 1:numel(paramsCam)
    if ~isempty(paramsCam{c})
        fprintf('Cam %d: error medio = %.4f px\n', ...

```

Figura 3-22: Finalización de calibración y carga del archivo `calib.mat`.

```

Command Window

1x4 cell array

{1x1 cameraParameters} {1x1 cameraParameters} {1x1 cameraParameters} {1x1 cameraParameters}

Cam 1: error medio = 0.5824 px
Cam 2: error medio = 0.5306 px
Cam 3: error medio = 0.7189 px
Cam 4: error medio = 0.5142 px

```

Figura 3-23: Errores medios de reproyección por cámara, con valores menores a 1 px.

La estimación y validación de extrínsecas se realizó estableciendo un marco común definido por el tablero. La salida del módulo `MeasureOnFloor` para un caso representativo se muestra en la Figura 3-24. La detección consistente del patrón en las cuatro cámaras se evidencia en la Figura 3-25, confirmando coherencia del marco de referencia utilizado para la reconstrucción multi-vista.

```
Command Window
Cam 1: checkerboard detectado de tamaño 8x8 (esquinas internas).
Numero de puntos detectados: 49

=== RESUMEN MeasureOnFloor (cam 1) ===
M1: X=-5.26 cm, Y=-7.77 cm
M2: X=34.65 cm, Y=33.19 cm
M3: X=-6.77 cm, Y=32.98 cm

Matriz de distancias (cm):
      0  57.1897  40.7828
57.1897  0  41.4132
40.7828  41.4132  0
```

Figura 3-24: Salida del módulo `MeasureOnFloor`: detección del tablero, coordenadas métricas de marcadores y matriz de distancias para validar extrínsecos.

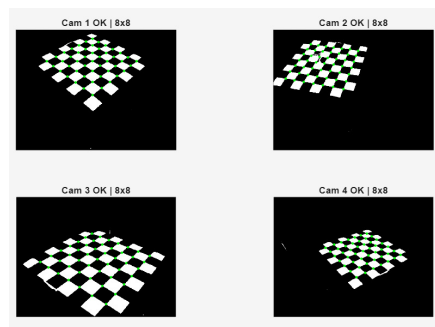


Figura 3-25: Detección del tablero 8×8 en Cam 1–Cam 4, habilitando un marco común para reconstrucción 3D.

3.5. Reconstrucción 3D y estimación angular (cuando es geoméricamente viable)

El objetivo de esta etapa fue reconstruir coordenadas 3D de marcadores (triangulación) y estimar ángulos articulares en 3D. Esta etapa depende de condiciones geométricas mínimas: detección de marcadores en al menos dos cámaras, correspondencias consistentes y parámetros extrínsecos válidos.

Se implementó un flujo multi-vista que captura imágenes sincronizadas, detecta centroides por cámara, asocia correspondencias P1–P2–P3 entre vistas y triangula para obtener coordenadas 3D. Un ejemplo de reconstrucción 3D y visualización del ángulo se presenta en la Figura 3-26. El resumen del módulo `MeasureArm3D_Multi`, incluyendo número de tomas válidas y el indicador `flip180` para corrección de interpretación angular, se muestra en la Figura 3-27.

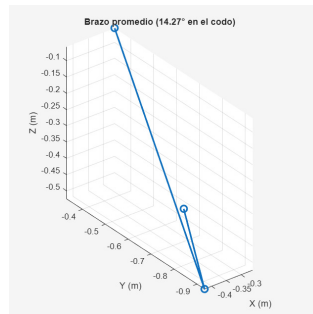


Figura 3-26: Ejemplo de reconstrucción 3D de tres puntos y visualización del ángulo estimado.

```

=== Resumen de MeasureArm3D_Multi ===
Tomas válidas: 10 de 10

--- Promedios (tomas válidas) ---
H_mean = [-0.184 -1.618 -1.132] m
C_mean = [-0.180 -1.683 -1.171] m
M_mean = [-0.196 -1.677 -1.223] m
Ángulo medio en el codo = 68.55° (flip180=1)
>>

```

Figura 3-27: Resumen del módulo `MeasureArm3D_Multi`: tomas válidas, puntos promedio (m) y ángulo promedio, indicando uso de `flip180`.

Para inspección de robustez, se analizó un caso de pérdida de detección en una cámara y operación con cámaras disponibles, como se observa en la Figura 3-28. Adicionalmente, se evaluó un caso de postura casi extendida que conduce a ángulos cercanos a 180° , según se evidencia en las Figuras 3-29 y 3-30.

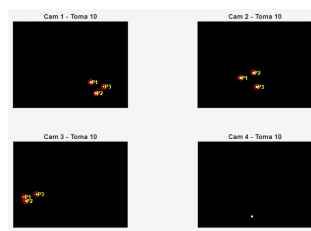


Figura 3-28: Control visual en una toma: detección P1–P3 en Cam 1–Cam 3 y ausencia de detección en Cam 4.

```

Command Window
Toma 7 / 10
OK: ang=90.41° | HC=0.209 CH=0.189 HI=0.277 m

Toma 8 / 10
OK: ang=90.38° | HC=0.209 CH=0.189 HI=0.277 m

Toma 9 / 10
OK: ang=90.41° | HC=0.209 CH=0.189 HI=0.277 m

Toma 10 / 10
OK: ang=90.39° | HC=0.209 CH=0.189 HI=0.277 m

```

Figura 3-29: Promedio de reconstrucción 2D mostrando distancias erróneas en un caso representativo.

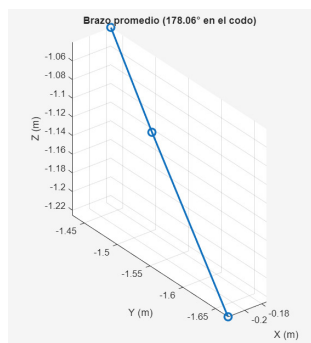


Figura 3-30: Reconstrucción 2D en postura casi extendida, con ángulo cercano a 180° según geometría de tres puntos.

3.6. Proyección al plano 2D

Durante las pruebas de reconstrucción tridimensional se identificó una limitación práctica asociada al proceso de calibración extrínseca. La calibración se realizó con el tablero de ajedrez apoyado sobre una mesa, lo cual restringió el movimiento del patrón a un plano prácticamente fijo. Esta condición impidió calibrar adecuadamente el espacio tridimensional (variaciones suficientes en profundidad y orientación), afectando la estimación 3D del ángulo articular en algunas configuraciones del brazo.

Debido a esta restricción geométrica, y con el objetivo de continuar la validación del sistema de medición angular, se optó por proyectar el problema a un plano 2D. En este enfoque, el cálculo del ángulo se realiza exclusivamente a partir de la disposición relativa de tres marcadores en el plano de imagen, sin considerar explícitamente las distancias métricas entre ellos, sino únicamente la geometría angular formada por los segmentos.

Para esta validación, se implementó un código específico en el cual los marcadores se colocaron físicamente formando un ángulo nominal de 90° , independientemente de la longitud de los segmentos. La referencia angular se estableció mediante un goniómetro manual, observado en la Figura 3-31, asegurando que la postura real del sistema correspondiera a un ángulo recto.



Figura 3-31: Verificación experimental del ángulo de referencia mediante goniómetro manual, configurado a 90° .

Una vez fijada la postura, se capturaron las imágenes simultáneas desde las cuatro cámaras OptiTrack Flex 3. En la Figura 3-32 se muestra la detección de los marcadores en cada cámara, evidenciando que, aunque la perspectiva varía entre vistas, la configuración angular se mantiene coherente en el plano de imagen.

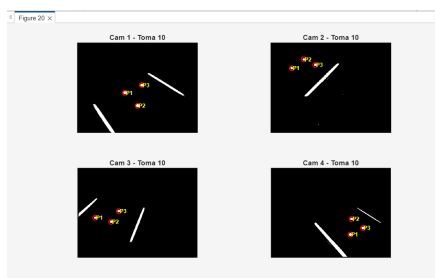


Figura 3-32: Vistas de las cuatro cámaras durante la prueba 2D con marcadores configurados a 90° .

El procesamiento en MATLAB permitió calcular el ángulo 2D por cámara y obtener un promedio entre las tomas válidas. En la Figura 3-33 se presenta la salida del sistema, donde se observa que el ángulo promedio estimado se aproxima a 90° y haciendo uso de la calibración de las cámaras.

```

Command Window
Toma 10 / 10 ...
Cam 1: dHc=96.439 px, dCh=98.470 px, dHt=111.969 px, ángulo2D=70.12°
Cam 2: dHc=79.339 px, dCh=66.726 px, dHt=125.820 px, ángulo2D=118.69°]
Cam 3: dHc=87.711 px, dCh=69.879 px, dHt=130.619 px, ángulo2D=111.46°
Cam 4: dHc=75.680 px, dCh=77.068 px, dHt=83.793 px, ángulo2D=66.53°
[OK] Ángulo 2D promedio en esta toma = 91.70° (flip180=0)

=== Resumen MeasureArm2D ===
Tomas válidas: 10 de 10
Ángulos por toma (2D, ya promedio de cámaras):
91.72° 91.70° 91.73° 91.71° 91.69° 91.72° 91.73° 91.70° 91.70° 91.70°
Ángulo medio 2D = 91.71° (flip180=0)

```

Figura 3-33: Resultado del cálculo del ángulo 2D en MATLAB para la postura de referencia a 90° .

Este procedimiento permitió validar correctamente el cálculo angular en 2D y confirmar la coherencia del algoritmo de detección y medición, aun cuando la calibración tridimensional completa se vio limitada por las condiciones físicas del entorno de captura. En consecuencia, el enfoque 2D se adoptó como una alternativa experimental válida para la verificación del sistema de medición de ángulos articulares.

3.6.1. Calibración y validación de distancias en 2D

Como verificación adicional, se implementó una calibración de escala en el plano 2D y se evaluó la capacidad de recuperar distancias relativas. La configuración con tres marcadores alineados y separaciones conocidas se presenta en la Figura 3-34. La prueba con ángulo nominal y distancia conocida se evidencia en la Figura 3-35. Los resultados de salida y

la representación gráfica del ángulo y distancias se muestran en las Figuras 3-36 y 3-37, respectivamente.

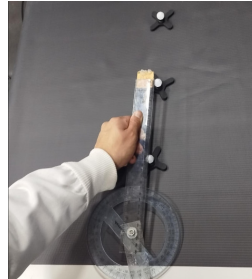


Figura 3-34: Configuración experimental para calibración de distancias: marcadores alineados con separaciones conocidas.

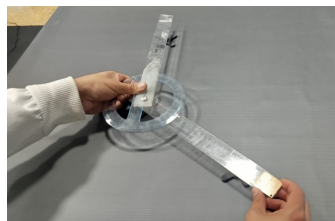


Figura 3-35: Configuración de prueba para medición de distancias y ángulo en el plano: ángulo aproximado de 130° y distancia conocida.

```

Command Window
Toma 8 / 10
[OK] ang=130.38° | HC=0.227 CM=0.201 HI=0.388 m

Toma 9 / 10
[OK] ang=130.37° | HC=0.227 CM=0.201 HI=0.388 m

Toma 10 / 10
[OK] ang=130.40° | HC=0.227 CM=0.201 HI=0.388 m

--- Promedios ---
Ángulo medio = 130.39°
HC=0.227 m | CM=0.201 m | HI=0.388 m
>>
  
```

Figura 3-36: Resultados en MATLAB para medición de distancias y ángulo en múltiples tomas, mostrando valores promedio cercanos a referencia.

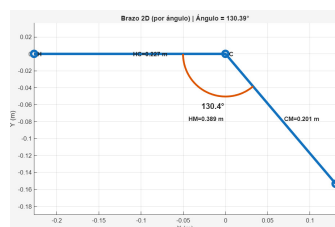


Figura 3-37: Representación gráfica en 2D del ángulo estimado y distancias calculadas entre marcadores tras calibración de escala en el plano.

3.6.2. Pruebas con sujeto colaborador y registro de referencia

Se realizaron pruebas con un sujeto colaborador para aproximar un escenario de uso. La postura del sujeto y la ubicación de marcadores se presentan en la Figura 3-38. La referencia angular con goniómetro (aprox. 115°) se muestra en la Figura 3-39. El resultado del procesamiento 2D del ángulo en MATLAB se presenta en la Figura 3-40. La interpretación de la diferencia entre coherencia angular y discrepancias métricas se discute en el capítulo de Resultados.



Figura 3-38: Prueba con sujeto colaborador y marcadores reflectivos ubicados en brazo y hombro.



Figura 3-39: Medición manual del ángulo del codo mediante goniómetro, con valor aproximado de 115° previo a adquisición.

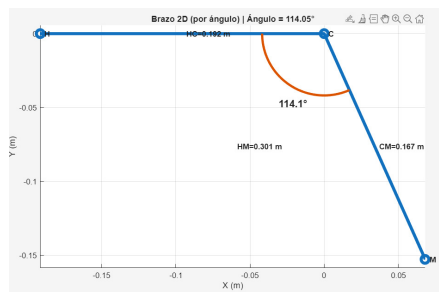


Figura 3-40: Resultado del procesamiento en MATLAB durante la prueba con sujeto colaborador, mostrando estimación del ángulo articular en el plano 2D.

3.7. Ciclo de datos y trazabilidad de entradas/salidas

Para formalizar la transformación de datos desde adquisición hasta salidas biomecánicas, se incluye el ciclo de datos del flujo propuesto, mostrado en la Figura 3-41. Este diagrama resume la secuencia: *frame* IR → centroides 2D → puntos 3D (si aplica) → ángulo → salidas (figuras, tablas y registros), facilitando la trazabilidad entre etapas y evitando que la metodología dependa de inferencias por parte del evaluador.

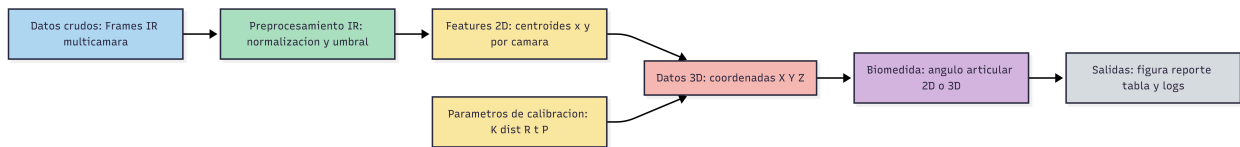


Figura 3-41: Diagrama del flujo de datos del procedimiento, desde adquisición de imágenes IR hasta generación de ángulos y salidas de análisis.

4 Resultados

4.1. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la validación experimental del sistema de captura de movimiento desarrollado, basado en cámaras OptiTrack Flex 3. En particular, los resultados permiten evaluar el cumplimiento del objetivo general del estudio de desarrollar un sistema de software de captura de movimiento abierto para análisis biomecánico, así como de los objetivos específicos relacionados con la adquisición de datos, la estimación angular y la reconstrucción geométrica. Los resultados se discuten considerando las condiciones experimentales descritas en el Capítulo III y el estado del arte revisado en el Capítulo II.

4.1.1. Estimación de ángulos articulares

Los resultados presentados en esta subsección permiten evaluar el cumplimiento del objetivo general del estudio, orientado al desarrollo de un sistema de captura de movimiento para análisis biomecánico, particularmente en lo referente a la estimación de ángulos articulares. Los resultados obtenidos para la estimación de ángulos articulares mostraron un comportamiento consistente y estable a lo largo de las pruebas experimentales. Durante las mediciones realizadas, las variaciones del ángulo articular estimado se mantuvieron dentro de un rango inferior a $\pm 2^\circ$ respecto al valor de referencia obtenido mediante goniómetro manual.

Este nivel de discrepancia se mantuvo entre tomas consecutivas y entre distintas cámaras, lo que evidencia la robustez del algoritmo de detección de marcadores y del cálculo geométrico del ángulo en el plano. La estabilidad observada es coherente con estudios previos que reportan errores angulares reducidos en sistemas ópticos basados en marcadores, atribuyendo las pequeñas diferencias principalmente a factores como la resolución de imagen, la proyección perspectiva y la colocación manual de los marcadores reflectivos [5, 23].

Diversas investigaciones han demostrado que, en configuraciones ópticas bien alineadas, la estimación de ángulos articulares es menos sensible a errores en profundidad que la estimación de distancias métricas absolutas, ya que el cálculo angular depende principalmente de relaciones geométricas relativas entre puntos [13, 16]. Este comportamiento explica que, incluso bajo una calibración realizada en un plano casi bidimensional, el sistema haya sido capaz de recuperar relaciones angulares con buena precisión.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para sistemas ópticos comerciales utilizados como referencia en estudios biomecánicos, donde errores angulares inferiores a 3° son considerados aceptables para análisis exploratorios y validaciones técnicas [14, 25].

4.1.2. Medición de distancias entre marcadores

Los resultados de esta subsección se relacionan directamente con el objetivo específico asociado al desarrollo de módulos de calibración volumétrica y reconstrucción tridimensional, evaluando la capacidad del sistema para estimar distancias métricas entre marcadores.

En contraste con los resultados angulares, la estimación de distancias entre marcadores presentó discrepancias sistemáticas respecto a los valores físicos esperados. En el caso del sujeto colaborador, las distancias reales entre los marcadores hombro–codo y codo–muñeca eran aproximadamente de 0,125 m cada una. No obstante, el sistema estimó distancias promedio de 0,192 m y 0,167 m, respectivamente.

Este comportamiento no corresponde a errores aleatorios del algoritmo de reconstrucción, sino a una limitación estructural asociada al procedimiento de calibración empleado. La calibración extrínseca del sistema se realizó utilizando un tablero de ajedrez ubicado sobre una mesa, lo que restringió el movimiento del patrón a un plano prácticamente bidimensional. Bajo estas condiciones, los parámetros extrínsecos estimados describen adecuadamente la geometría en el plano de calibración, pero no capturan de forma óptima las variaciones en el eje de profundidad (Z).

La literatura ha documentado ampliamente que las calibraciones planas limitan la precisión métrica tridimensional cuando los puntos reconstruidos se encuentran fuera del plano de referencia, introduciendo errores sistemáticos en la estimación de distancias absolutas [11, 15]. Cuando los marcadores se encuentran elevados respecto al plano de calibración, la proyección geométrica induce una sobreestimación de las longitudes reales, fenómeno consistente con el observado experimentalmente.

Estudios de validación metrológica en sistemas ópticos indican que la exactitud submilimétrica solo puede garantizarse cuando el patrón de calibración excita adecuadamente el espacio tridimensional, incorporando variaciones significativas en profundidad y orientación [16, 23]. En ausencia de dicha variabilidad espacial, los errores métricos se concentran principalmente en el eje perpendicular al plano de calibración, afectando la medición de distancias pero no necesariamente las relaciones angulares.

4.1.3. Interpretación global de los resultados

En conjunto, los resultados obtenidos permiten establecer una relación clara entre los objetivos planteados y el desempeño experimental del sistema desarrollado. El objetivo general del estudio se cumple en cuanto el sistema es capaz de adquirir datos ópticos, procesarlos y

estimar ángulos articulares de forma consistente en un entorno de laboratorio controlado. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema desarrollado es confiable para la estimación de ángulos articulares bajo condiciones experimentales controladas, incluso cuando la calibración se realiza en un entorno bidimensional. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se establece que la estimación angular es menos sensible a errores de profundidad que la estimación de distancias absolutas [13, 25]. Estos resultados confirman que la arquitectura de adquisición y procesamiento propuesta es adecuada para análisis angulares biomecánicos, mientras que la medición de distancias métricas absolutas requiere una calibración volumétrica más completa para cumplir plenamente el objetivo específico de reconstrucción tridimensional.

Por otro lado, los resultados evidencian que la medición precisa de distancias métricas requiere una calibración volumétrica más completa, con desplazamientos del patrón en el espacio tridimensional. Esta observación no invalida el sistema propuesto, sino que delimita su alcance experimental y pone de manifiesto la importancia del procedimiento de calibración como factor determinante de la exactitud métrica [11, 15].

Los resultados obtenidos permiten responder de manera fundamentada a las preguntas de investigación planteadas al inicio del estudio. En particular, se verificó que es posible estimar ángulos articulares de forma consistente mediante un sistema de visión basado en cámaras infrarrojas y marcadores reflectivos, bajo una calibración simplificada y en un entorno de laboratorio controlado.

Asimismo, se confirmó que la precisión en la estimación de distancias métricas depende directamente del volumen de calibración y de la correcta caracterización del eje de profundidad, tal como se reporta en estudios previos de validación de sistemas ópticos [16, 23]. Este resultado respalda la hipótesis de que la calibración volumétrica constituye un requisito indispensable para aplicaciones que requieran mediciones métricas absolutas.

4.1.4. Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, la validación experimental se realizó con un número reducido de participantes, correspondiendo a pruebas exploratorias con un único sujeto colaborador. Esta condición limita la generalización estadística de los resultados, aunque es consistente con el carácter técnico y metodológico del trabajo.

En segundo lugar, la calibración del sistema se llevó a cabo utilizando un patrón plano, lo que restringió la excitación tridimensional del espacio de captura y afectó la precisión en la estimación de distancias absolutas. La literatura indica que este tipo de calibración es adecuada para validar relaciones geométricas relativas, pero no para garantizar exactitud métrica tridimensional [11, 15].

Finalmente, las restricciones de tiempo y recursos impidieron la implementación de una calibración volumétrica completa mediante patrones móviles en el espacio tridimensional. No

obstante, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, sino que definen claramente el alcance del estudio y orientan futuras mejoras del sistema, particularmente en la extensión del procedimiento de calibración y en la validación con un mayor número de sujetos.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se desarrolló un sistema de software de captura de movimiento basado en visión por computador, integrando cámaras OptiTrack Flex 3 con el entorno MATLAB mediante funciones MEX, cumpliendo el objetivo general de implementar una plataforma abierta orientada al análisis biomecánico del movimiento.
- Se implementó una interfaz de comunicación de bajo nivel entre MATLAB y las cámaras OptiTrack Flex 3 utilizando el *Camera SDK* del fabricante, permitiendo la adquisición directa y sincronizada de imágenes infrarrojas sin depender del software propietario, en concordancia con el primer objetivo específico.
- Se desarrollaron módulos de detección 2D de marcadores reflectivos, calibración intrínseca y estimación de parámetros extrínsecos, así como rutinas de reconstrucción tridimensional mediante triangulación multivista.
- Los resultados experimentales demostraron que el sistema permite estimar ángulos articulares de forma consistente, con desviaciones menores a $\pm 2^\circ$ respecto a mediciones de referencia realizadas con goniómetro manual, validando la capacidad del sistema para análisis angular biomecánico.
- La estimación de distancias métricas entre marcadores presentó discrepancias significativas en comparación con valores físicos reales, atribuibles principalmente a las limitaciones del proceso de calibración extrínseca realizado sobre un patrón con variaciones geométricas restringidas, lo que evidencia la necesidad de una calibración tridimensional más robusta.
- Debido a las restricciones experimentales del entorno de captura, se adoptó un enfoque de medición en dos dimensiones como alternativa válida para la verificación del cálculo angular, permitiendo cumplir los objetivos experimentales aun cuando la modelación completa de la profundidad no fue posible.
- Se generaron salidas estructuradas en forma de visualizaciones, tablas y registros de datos, lo que establece una base funcional para la exportación de información orientada al análisis biomecánico, cumpliendo el objetivo específico relacionado con la generación y organización de datos para estudios posteriores.

5.2. Recomendaciones

- Implementar una calibración volumétrica tridimensional utilizando un patrón móvil que permita variar posición y orientación en el espacio, mejorando la estimación de distancias.
- Incorporar estructuras o soportes ajustables que faciliten la calibración en el eje de profundidad y reduzcan los errores asociados a la proyección al plano.
- Ampliar el número de participantes en futuras pruebas experimentales para evaluar la repetibilidad y robustez del sistema en distintos sujetos.
- Optimizar la disposición de las cámaras y el volumen de captura con el fin de minimizar oclusiones y mejorar la calidad de detección de los marcadores.
- Integrar modelos cinemáticos y técnicas de filtrado temporal que permitan reducir el ruido y mejorar la estabilidad de las mediciones angulares y métricas.

Bibliografía

- [1] ADLOU, Bahman ; WILBURN, Christopher ; WEIMAR, Wendi. *Motion Capture Technologies for Athletic Performance Enhancement and Injury Risk Assessment: A Review for Multi-Sport Organizations*. 2025
- [2] AHMED, A. ; TRAN, M. ; DE LA FUENTE, C. ; LUNDH, T. ; SAMUELSSON, K. ; TOOM, A.: Validation of IMU-Based Motion Analysis Against Optical Reference and Development of an Open-Source Pipeline in a Transfemoral Amputee. En: *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation* 21 (2024), Nr. 1, p. 1–15
- [3] AVOGARO, A. ; MARIN, R. ; PERUZZO, A. ; MASIERO, S. ; MUNARO, M.: Markerless Human Pose Estimation for Biomedical Applications: A Survey. En: *Frontiers in Computer Science* 5 (2023), p. 1–18
- [4] CASTILLO, B. ; RIASCOS, C. ; FRANCO, J. M. ; MARULANDA, J. ; THOMSON, P.: Assessing Spatiotemporal Behavior of Human Gait: A Comparative Study Between Low-Cost Smartphone-Based Mocap and OptiTrack Systems. En: *Experimental Techniques* 49 (2025), p. 3–13
- [5] CHEN, Qing ; ZHOU, Yu ; WANG, Yong ; ZHU, Maomao ; GUO, Lei ; HE, Changxu: Research on stability and accuracy of the OptiTrack system based on mean error. En: *Proceedings of SPIE*, 2021, p. 75
- [6] DAS, Kishor ; OLIVEIRA, Thiago de P. ; NEWELL, John: Comparison of markerless and marker-based motion capture systems using 95% functional limits of agreement in a linear mixed-effects modelling framework. En: *Scientific Reports* 13 (2023), p. 1–15
- [7] D’HAENE, Mathis ; CHORIN, Frédéric ; COLSON, Serge S. ; GUÉRIN, Olivier ; ZORY, Raphaël ; PICHE, Elodie: Validation of a 3D Markerless Motion Capture Tool Using Multiple Pose and Depth Estimations for Quantitative Gait Analysis. En: *Sensors* 24 (2024), p. 1–18
- [8] FUKUSHIMA, K. ; MUTSUKURA, R. ; FUKUDA, T.: The Potential of Human Pose Estimation for Motion Capture in Sports: A Validation Study. En: *Sports Engineering* 27 (2024), p. 1–12

-
- [9] GUTIERREZ, Manuel ; GOMEZ, Britam ; RETAMAL, Gustavo ; PEÑA, Guisella ; GERMAN, Enrique ; ORTEGA-BASTIDAS, Paulina ; AQUEVEQUE, Pablo: Comparing Optical and Custom IoT Inertial Motion Capture Systems for Manual Material Handling Risk Assessment Using the NIOSH Lifting Index. En: *Technologies* 12 (2024), p. 1–22
- [10] HARTER, Derek ; LU, Shulan: MotionRender: A simple Python implementation of video motion visualization for 3D motion capture data. En: *F1000Research* 13 (2024), p. 1–9
- [11] JATESIKTAT, P. ; WANG, R. ; LI, Y. ; LIU, S.: Multi-Camera Calibration Using Far-Range Dual-LED Wand and Near-Range Chessboard Fused in Bundle Adjustment. En: *Sensors* 24 (2024), Nr. 23, p. 7416
- [12] KRUMPEK, Oliver ; KROEGER, Ole ; MOHR, Sebastian: Reproducible Optical Tracking Precision: Evaluating a Static, Near-Parallel Support Structure for OptiTrack PrimeX22 Cameras. En: *arXiv* (2025), p. 1–6
- [13] LUGRÍS, Urbano ; PÉREZ-SOTO, Manuel ; MICHAUD, Florian ; CUADRADO, Javier: Human motion capture, reconstruction, and musculoskeletal analysis in real time. En: *Multibody System Dynamics* 60 (2023), p. 3–25
- [14] MAUNTEL, Timothy C. ; CAMERON, Kenneth L. ; PIETROSIMONE, Brian ; MARSHALL, Stephen W. ; HACKNEY, Anthony C. ; PADUA, Darin A.: Validation of a commercially available markerless motion-capture system for trunk and lower extremity kinematics during a jump-landing assessment. En: *Journal of Athletic Training* 56 (2021), p. 177–190
- [15] MEYER, Zakariya ; PRETORIUS, Arnold: Design of a low-cost optical motion capture system using a multi-camera configuration and an asynchronous extended Kalman filter. En: *MATEC Web of Conferences* 406 (2024), p. 1–20
- [16] NAGYMÁTÉ, Gergely ; KISS, Rita M.: Motion capture system validation with surveying techniques / Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering. Budapest, 2018. – Informe de Investigación. – 26501–26506 p.
- [17] OPTITRACK. *Camera SDK — External OptiTrack Documentation*. 2012
- [18] OPTITRACK. *Camera SDK — OptiTrack.com*. 2012
- [19] OPTITRACK. *NatNet 4.3 — External OptiTrack Documentation*. 2012
- [20] OPTITRACK. *OptiTrack MATLAB Plugin — External OptiTrack Documentation*. 2012
- [21] RICO-GARCÍA, Mateo ; BOTERO-VALENCIA, Juan ; HERNÁNDEZ-GARCÍA, Ruber: Vertical Jump Data from Inertial and Optical Motion Tracking Systems. En: *Data* 7 (2022), p. 1–6

-
- [22] SCHEPELMANN, Alexander ; GERDTS, Stephen: Characterization of Infrared Optical Motion Tracking System in NASA's Simulated Lunar Operations (SLOPE) Laboratory / NASA. Ohio, 2022. – Informe de Investigación. – 1–16 p.
- [23] SCHROEDER, Stefan ; JAEGER, Sebastian ; SCHWER, Jonas ; SEITZ, Andreas M. ; HAMANN, Isabell ; WERNER, Michael ; THORWAECHTER, Christoph ; SANTOS, Inês ; WENDLER, Toni ; NEBEL, Dennis ; WELKE, Bastian: Accuracy measurement of different marker based motion analysis systems for biomechanical applications: A round robin study. En: *PLOS ONE* 17 (2022), p. 1–18
- [24] TAETZ, Bertram ; LORENZ, Michael ; MIEZAL, Markus ; STRICKER, Didier ; BLESER-TAETZ, Gabriele: JointTracker: Real-time inertial kinematic chain tracking with joint position estimation. En: *Open Research Europe* 4 (2025), p. 1–46
- [25] TAK, Igor ; WIERTZ, Willem P. ; BARENDRECHT, Maarten ; LANGHOUT, Rob: Validity of a new 3-d motion analysis tool for the assessment of knee, hip and spine joint angles during the single leg squat. En: *Sensors* 20 (2020), p. 1–14
- [26] YANG, Junhyuk ; PARK, Kiwon: Improving Gait Analysis Techniques with Markerless Pose Estimation Based on Smartphone Location. En: *Bioengineering* 11 (2024), p. 1–15