



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Desarrollo de un sistema de adquisición de la biomecánica
angular de las extremidades inferiores, para valorar la marcha
humana.**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor:

JUAN SANTIAGO CABRERA GARCÍA

Director:

ING. ESTEBAN JAVIER MORA TOLA

CUENCA, ECUADOR

2023

DEDICATORIA

Este trabajo tuvo como inspiración el constante e incansable esfuerzo de Noelia Valverde Bojorque, su hermana y padres, quienes se han adaptado con ejemplar resiliencia y fe dado que Noelia poco después de su nacimiento fue diagnosticada con Atrofia Muscular Espinal, condición que impide su desarrollo motriz y crea la necesidad de frecuentes revisiones con especialistas de la salud y de terapias de rehabilitación física. A pesar de las dificultades que enfrentan a diario, inherentes a esta condición, su determinación como familia y su positividad resultan una motivación para quienes tenemos la oportunidad de aportar en el ámbito de la rehabilitación física, sea desde el ámbito médico o, como en el caso de este trabajo, dotando de sistemas tecnológicos que faciliten las terapias, con el ideal de que en un futuro no muy lejano, a nivel local existan más y mejores tratamientos para quienes, al igual que Noelia y su familia, encaran su día a día con el optimismo de alcanzar una mejor calidad de vida.

AGRADECIMIENTOS

Como autor agradezco el acompañamiento del Ing. Esteban Mora que se mantuvo involucrado en todo el proceso de planificación y desarrollo del presente trabajo, así como la guía brindada por el Ing. Hugo Torres durante la elaboración de este artículo, a mi buen amigo Luis Alvear por su esfuerzo para lograr sinergia como compañeros, a mis padres por el soporte incondicional en cada etapa de desarrollo académico junto a mis hermanos por su disposición de colaborar y apoyar en todo lo necesario sin importar las circunstancias, a mis suegros y cuñada por el ánimo y de manera especial a mi dulce esposa que ha mantenido el temple necesario para sostener el hogar de todas las formas posibles, asumiendo las responsabilidades del trabajo y la familia, incluyendo la crianza de nuestro hijo, en ocasiones sola debido a mis ausencias durante las horas de preparación académica. Agradecido a todos ellos por la inspiración inmensurable y motivado para ejercer de la manera más digna y eficiente mi profesión, les expreso mi cariño infinito.

Resumen:

Este trabajo presenta la aplicación de videogrametría para la adquisición de la biomecánica angular de los miembros inferiores durante un ciclo de la marcha, que incluye el diseño e implementación de un sistema de hardware integrado que permitió la digitalización de las señales mencionadas. Los videos fueron grabados con cámaras infrarrojas sincronizadas y con marcadores reflectantes de captura de movimiento colocados estratégicamente en las extremidades inferiores de dieciocho sujetos de prueba. Los videos generados se procesaron utilizando un software de análisis cinemático especializado (Kinovea) para determinar los ángulos relativos entre los marcadores de movimiento. Los resultados se presentan como gráficos que muestran la variación angular de las articulaciones de la rodilla y el tobillo durante la marcha. El trabajo concluyó con éxito comparando y comprobando las coincidencias entre los resultados obtenidos y las muestras generadas en otro estudio de referencia.

Palabras clave: Biomecánica de la marcha, Kinovea, captura de movimiento, cámaras infrarrojas., videogrametría

Abstract:

This work presents the application of videogrammetry for the acquisition of angular biomechanics of the lower limbs during a gait cycle, which includes the design and implementation of an integrated hardware system that allowed digitalization of the mentioned signals. The videos were recorded with synchronized infrared cameras and with reflective motion capture markers strategically placed on the lower limbs of eighteen test subjects. The generated videos were then processed by using specialized kinematic analysis software (Kinovea) to determine the relative angles between the motion markers. The results are presented as graphs showing the angular variation of the knee and ankle joints during gait. The work concluded successfully by comparing and verifying the coincidences between the results obtained and the samples generated in another reference study.

Keywords: Biomechanics, Kinovea, gait, infrared cameras., motion capture, videogrammetry



Este certificado se encuentra en el repositorio digital de la Universidad del Azuay, para verificar su autenticidad escanee el código QR

Este certificado consta de: 1 página

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	i
Dedicatoria y agradecimientos	ii
Dedicatoria y agradecimientos	iii
Resumen y abstract.....	iv
Índice de contenidos.....	v
Índice de tablas y figuras.....	vi
Índice de tablas y figuras.....	vi
Introducción	1
Metodología	2
<i>Diseño</i>	2
<i>Adquisición de señales</i>	3
<i>Procesamiento de video</i>	4
Resultados	5
Conclusiones	8
Reconocimiento.....	8
Referencias	8

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Tabla de información relevante sobre sujetos de prueba	1
---	---

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ejemplificación del montaje del sistema	2
Fig. 2. Capturas del video sincronizado y los elementos de grabación.....	3
Fig. 3. Diagrama logístico de conexiones del sistema	3
Fig. 4. Colocación de marcadores de movimiento reflectivos	3
Fig. 5. Ubicación del trocánter mayor en el fémur.....	3
Fig. 6. Ubicación de la cabeza del peroné respecto a la rótula.....	3
Fig. 7. Ubicación del quinto metatarsiano respecto a los dedos del pie.....	4
Fig. 8. Ubicación del quinto metatarsiano respecto a los dedos del pie.....	4
Fig. 9. Posicionamiento de las cámaras respecto al sujeto de prueba	4
Fig. 10. Captura de video sincronizado por la cámara 1 (lateral al sujeto).....	4
Fig. 11. Captura de video sincronizado por la cámara 2 (lateral al sujeto).....	4
Fig. 12. Captura de video sincronizado por la cámara 3 (frontal al sujeto)	4
Fig. 13. Interfaz de la herramienta calibración de cámara.	5
Fig. 14. Captura del procesamiento durante el seguimiento angular	5
Fig. 15. Capturas de gráficas de biomecánica angular vs tiempo de rodilla (superior) y tobillo (inferior) obtenidas en procesamiento de video aleatorio	5
Fig. 16. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 1	5
Fig. 17. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 2	6
Fig. 18. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 3	6
Fig. 19. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 4	6
Fig. 20. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 5	6
Fig. 21. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 6	6
Fig. 22. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 7	6
Fig. 23. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 8	6
Fig. 24. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 9	6
Fig. 25. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 10	6
Fig. 26. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 11	6
Fig. 27. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 12	6
Fig. 28. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 13	6
Fig. 29. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 14	7
Fig. 30. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 15	7
Fig. 31. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 16	7
Fig. 32. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 17	7
Fig. 33. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 18	7
Fig. 34. Gráficas angulares en función del tiempo obtenidas con el sistema desarrollado .	7

Desarrollo de un sistema de adquisición de la biomecánica angular de las extremidades inferiores para valorar la marcha humana.

Juan Santiago Cabrera García
Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
juansacg@es.uazuay.edu.ec

Resumen— Este trabajo presenta la aplicación de videogrametría para la adquisición de la biomecánica angular de los miembros inferiores durante un ciclo de la marcha, que incluye el diseño e implementación de un sistema de hardware integrado que permitió la digitalización de las señales mencionadas. Los videos fueron grabados con cámaras infrarrojas sincronizadas y con marcadores reflectantes de captura de movimiento colocados estratégicamente en las extremidades inferiores de dieciocho sujetos de prueba. Los videos generados se procesaron utilizando un software de análisis cinemático especializado (Kinovea) para determinar los ángulos relativos entre los marcadores de movimiento. Los resultados se presentan como gráficos que muestran la variación angular de las articulaciones de la rodilla y el tobillo durante la marcha. El trabajo concluyó con éxito comparando y comprobando las coincidencias entre los resultados obtenidos y las muestras generadas en otro estudio de referencia.

Palabras clave— Biomecánica de la marcha, Kinovea, captura de movimiento, cámaras infrarrojas, videogrametría.

I. INTRODUCCIÓN

Un correcto patrón de marcha está directamente relacionado a una buena postura para evitar lesiones en el sistema músculo esquelético y al desarrollo pleno de una vida saludable, al punto de que su estudio resulta crucial desde el análisis del desarrollo fisiológico de infantes hasta su evaluación en la élite deportiva. Aunque un patrón de marcha incorrecto no suele estar necesariamente ligado a dolor y otras molestias físicas notables a temprana edad, dichas alteraciones pueden estar relacionadas a problemas más serios como enfermedades neuromusculares no detectadas o, por otro lado, suelen derivar en alteraciones físicas del sistema músculo-esquelético, llegando incluso a presentar deformaciones y desviaciones que, en caso de lograrse una detección y diagnóstico tempranos, pueden tratarse por medio de terapias como se explica en [1].

Una valoración oportuna y precisa, permite diseñar e implementar un tratamiento correctivo que puede incluir sesiones de terapia asistida y/o ayudas ortopédicas que permitan corregir el patrón de marcha. En [2], el equipo de fisioterapeutas considera a la marcha como la combinación de movimientos corporales asociados al desplazamiento en el espacio, realizada en posición bípeda acorde a los patrones motrices bipodales (momento en el que ambos pies están en contacto con el suelo), y los monopodales (cuando un solo pie trabaja en el balance, apoyo e impulso), propios del ser humano. Como conclusión a su trabajo, los especialistas

comentan que, buscando garantizar un análisis correcto y objetivo, existe la necesidad de determinar con alta fiabilidad los parámetros de marcha, así como los parámetros que llegan a alterarlos.

Sobre las fases de la marcha, en [3], se detalla que los pasos realizados forman zancadas y menciona como parámetros espacio-temporales a considerarse formalmente para una posterior valoración y análisis fisiológico los

siguientes: tiempos entre pasos, tiempos de balanceo y apoyo, cadencia, longitud y velocidad de los pasos. Se explica que factores como la estatura y peso resultan cruciales para realizar una valoración apropiada, describiendo fórmulas que relacionan estos valores para facilitar el análisis de los mismos, así como otros parámetros estandarizados en su valoración. Concluye afirmando que en la marcha humana existen fases claramente distinguibles, así como variables espacio-temporales a las que es posible cuantificar con claridad siempre y cuando se cuente con el conocimiento y una instrumentación adecuada, misma que se describe como no necesariamente costosa, siendo posible llevar a cabo evaluaciones y valoraciones realizadas en entornos sin infraestructura mayormente especializada para este fin.

Los investigadores de [4], plantean el diseño e implementación de un Laboratorio de Marcha enfocado en la adquisición y registro de varias métricas dinámicas asociadas al movimiento humano. Con el fin de sintetizar juntamente los datos obtenidos, proponen el uso de galgas extenciométricas y la elaboración de una plataforma sobre la que el paciente camine libremente, esto al mismo tiempo que se realizan mediciones electromiográficas (EMG) estandarizadas, para luego integrar todos los datos obtenidos en un análisis de equilibrio. Este estudio tiene como condición de funcionamiento que deberá trabajar a bajas frecuencias para hacer posible el filtrado y procesado de las lecturas realizadas por las galgas.

El concepto de ‘laboratorio de marcha’ se entiende como un conjunto de herramientas que hacen posible la adquisición de medidas para realizar análisis cuantitativos de los patrones de movimiento. En [5], se ha logrado implementar un prototipo de bajo costo, aplicando una implementación modular y escalable. En cuanto a los elementos que permiten hacer la captura de medidas angulares, se usan cámaras para monitoreo y evaluación del paciente a través de las imágenes

y marcadores reflectantes para la reconstrucción y medición de ángulos.

En [6] se describe parte de los avances históricos alcanzados en busca de obtener métricas cuantitativas a través de instrumentado y tecnología altamente especializada. Además, se establece como parámetros indispensables que, los pacientes a evaluar, deben medir al menos 1 metro de altura, ser mayores a 4 años de edad, aportar una colaboración y tener capacidad de marcha, es decir que pueda desplazarse por sí mismo. Como medio para la captura de movimiento, describe el proceso de adquisición de medidas angulares, al colocar marcadores pasivos sobre la piel del paciente, mismos que son de tipo reflectante y se ubican en puntos estratégicos relativos a referencias óseas, luego se solicita al paciente caminar de manera natural siguiendo una trayectoria predeterminada. El sistema implementado en su investigación trabaja con videocámaras convencionales grabando sincronizadamente con cámaras infrarrojas, por lo que se denomina como sistema optoelectrónico.

La técnica de captura de señales EMG es contemplada en [7], donde se propone utilizar sensores EMG con el fin de monitorizar la actividad efectuada en los músculos relacionada a los movimientos y a las fuerzas ejercidas durante las fases que comprenden la marcha humana, para posteriormente analizar estas señales. En las conclusiones de su estudio demuestra que las lecturas obtenidas permiten un monitoreo de la actividad muscular, sin embargo, no demuestra ser un parámetro suficiente para determinar anomalías en el patrón de marcha, mismas que son indispensables al considerar una posterior valoración por parte de un especialista médico.

La implementación de un laboratorio para análisis de marcha no necesariamente implica que los especialistas reemplacen el análisis de la marcha observacional empleado desde la existencia de la fisioterapia, sino, aprovechar el alcance tecnológico actual a través del uso de aplicaciones y otros métodos prácticos. Entre los más empleados se consideran el trabajo de videogrametría, EMG y dinamometría, descritas en [8].

Dado que las medidas angulares de la rodilla durante la marcha se consideran variables cinemáticas, en [9] se concluyó que, es posible cuantificar los parámetros angulares aplicando fotogrametría, es decir, a través de un sistema computarizado para la captura de imágenes a partir de un video de la marcha de un sujeto sano.

En [10], se plantea la videogrametría como uno de los más eficientes, viables y fiables métodos de captura de variables biomecánicas angulares, en un total de 83 casos de estudio iniciales. Se determinó además que el análisis de video en 2 dimensiones presenta una alternativa válida, pero considerablemente más económica, en reemplazo del costoso análisis cinemático en 3 dimensiones.

Para la captura de video, una opción es el uso de cámaras de alta velocidad, que son capaces de capturar imágenes a una alta velocidad de fotogramas, lo que les permite registrar eventos o fenómenos que se mueven rápidamente. Estas cámaras pueden capturar una gran cantidad de fotogramas por segundo, que van desde cientos a miles, según el modelo y la tecnología utilizada. Esto permite proporcionar imágenes detalladas y de alta resolución de eventos que serían difíciles o imposibles de observar a simple vista. Las cámaras de alta velocidad se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluida

la investigación científica, los procesos industriales y el análisis deportivo. Por ejemplo, las cámaras de alta velocidad se han utilizado en la investigación científica del deporte para estudiar la mecánica de los movimientos de los atletas y en la investigación médica para estudiar la dinámica del flujo sanguíneo en el cuerpo humano [11].

En nuestro medio, los especialistas no cuentan con sistemas de adquisición cuantitativos para llevar a cabo valoraciones de diagnóstico, dichas evaluaciones se realizan basadas en observación empírica por parte del especialista, resultando ambiguas. Contar con un sistema de análisis de la marcha que se base en un método de evaluación fidedigno, habilita una siguiente etapa de investigación llevando a cabo un posterior análisis cuantitativo a partir de los datos recopilados. El presente trabajo busca implementar un sistema de adquisición de la biomecánica angular de las extremidades inferiores para valorar la marcha humana, con el fin de dotar una mejor instrumentación al personal especializado en el área de fisiología.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño

Al investigar los elementos de hardware y software más idóneos para adquirir señales de biomecánica angular de las extremidades inferiores, se indagó en trabajos similares publicados con información relativa a métodos y dispositivos empleados, donde luego de sopesar la aplicabilidad de diferentes técnicas, se descartaron los procedimientos que incluían el uso de electrodos [7], acelerómetros o sensores resistivos [4], optando por implementar videogrametría como se explica en [5], valiéndose de marcadores de movimiento reflectantes pasivos [12] y cámaras de video con modo de visualización infrarroja sincronizadas para un posterior procesamiento por software para determinar las métricas angulares caracterizadas, como detalla [9]. Se ilustra una representación del sistema en la Fig. 1.



Fig. 1. Ejemplificación del montaje del sistema en referencia a [5].

Una vez determinado el método de adquisición de señales por video, se hicieron pruebas de grabación con diferentes tipos de cámaras en diversas configuraciones, con el propósito de maximizar la fidelidad de muestreo, evitando deformaciones propias de la mayoría de dispositivos de video, como el denominado ‘ojo de pez’. A la par, con el fin de que la grabación se realice de manera simultánea y sincronizada, durante las pruebas iniciales se consideraron también las diferentes interfaces y formas de operación de cámaras de acción tipo GoPro, cámaras IP conectadas mediante puerto ethernet, y cámaras analógicas de circuito cerrado de televisión (CCTV).

Al finalizar las pruebas iniciales se consideró que, debido a la compleja interfaz y proceso de enlace para las cámaras IP, la distorsión presentada en las cámaras de acción, y la función infrarroja propia de las cámaras de CCTV, se optó por usar

éstas últimas junto con un grabador DVR con capacidad de hasta ocho canales, este sistema permite de manera eficaz y simplificada, grabaciones sincronizadas de 3 cámaras, como se puede apreciar en la Fig. 2.



Fig. 2. Capturas del video sincronizado y los elementos de grabación.

Cada cámara debe ser alimentada con 12VDC y conectada al grabador con un par de baluns (balanced-unbalanced lines transformer) unidos entre sí por cable UTP (unshielded twister pair). Se incluye un monitor conectado al grabador para facilitar el trabajo del especialista durante las sesiones. La exportación de segmentos de video se realiza a través de una memoria USB externa para su posterior procesamiento en un computador. El detalle de conexiones se aprecia en la Fig. 3.

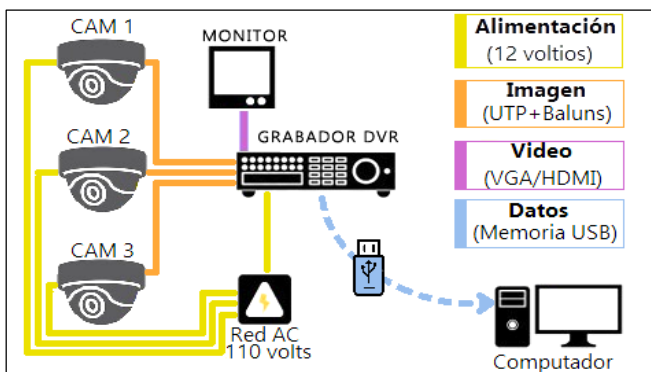


Fig. 3. Diagrama logístico de conexiones del sistema.

Para asegurar la eficacia del procesamiento offline de las grabaciones, se usaron marcadores de movimiento pasivo, mismos que se elaboraron con material reflectivo sobre un fondo negro. Estos marcadores cuentan con la ventaja de verse en un color blanco muy notorio en los videos realizados con cámaras infrarrojas en conjunto con iluminación de la misma frecuencia, que por lo general ya viene incorporada en las cámaras analógicas convencionales de CCTV. Esta propuesta facilita la posterior identificación, por contraste, de la posición de todos los marcadores en cada frame del video. La ubicación de cada marcador se basa en el protocolo de [13] como se ve en la Fig. 4.



Fig. 4. Colocación de marcadores de movimiento reflectivos.

B. Adquisición de señales

Con el propósito de adquirir señales analógicas de la biomecánica angular durante el movimiento de las extremidades inferiores, relacionadas al patrón en marcha, se llevó a cabo un proceso analítico – experimental, que, a través de cámaras de video sincronizadas, permitió un procesamiento offline de los videos individuales. Acorde al funcionamiento del laboratorio de marcha explicado en [6] y con el propósito de disponer de un sistema redundante evitando así el ocasional traslapeo de señales de los marcadores pasivos como se explica en [14], se instalaron 3 cámaras de video que fueron previamente modificadas para funcionar en modo infrarrojo de forma continua.

Para llevar a cabo las pruebas de funcionamiento, primero se solicitó, a cada participante, firmar un consentimiento informado a cada participante, como medida de respaldo bioética y en cumplimiento a la normativa ecuatoriana vigente establecida en el acuerdo ministerial 5316 para procedimientos diagnósticos terapéuticos o preventivos detallado en [15]. Con el fin de obtener muestras fiables y minimizar errores, se requirió a los participantes del estudio, despojarse de su calzado e indumentaria en general para vestir únicamente ropa interior ajustada, preferentemente negra, facilitando así el desarrollo del procedimiento. Sucesivamente, se les demostró la manera en que se les realizarían las palpaciones para encontrar los puntos correctos de ubicación de los marcadores de movimiento en los siguientes puntos de coyuntura articular ósea:

- Trocánter mayor, se encuentra al pedir que el sujeto realice movimientos circulares con el pie, su localización se ilustra en la Fig. 5.

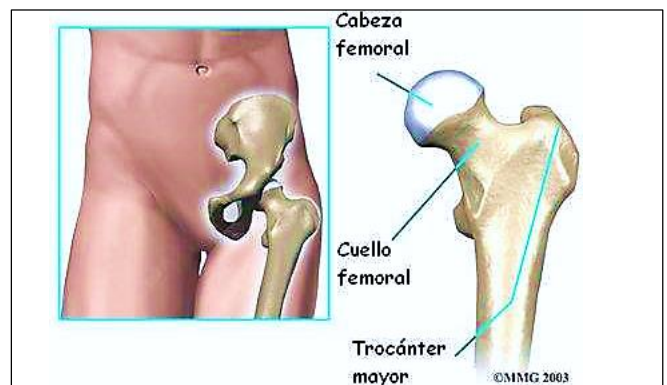


Fig. 5. Ubicación del trocánter mayor en el fémur [16].

- Cabeza del peroné, encontrado al pedir al sujeto subir y bajar el pie, destaca en la parte exterior de la pierna, bajo el nivel de la rótula como se muestra en la Fig. 6.

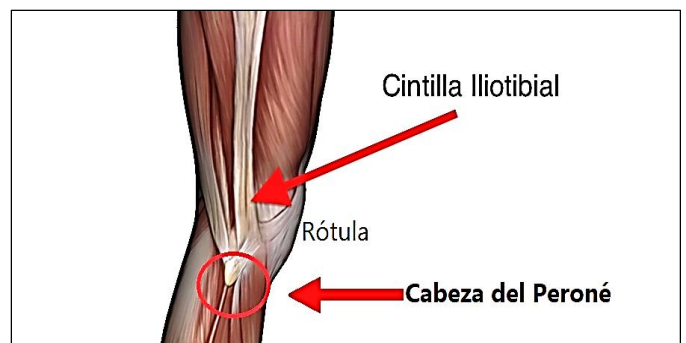


Fig. 6. Ubicación de la cabeza del peroné respecto a la rótula [17].

- Maléolo lateral o externo, ubicado en el punto más saliente del tobillo, en la parte lateral externa del pie con ligera forma semiesférica como se ve en la Fig. 7.

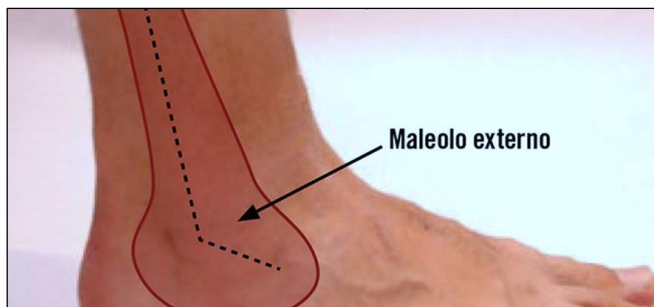


Fig. 7. Ubicación del maleolo en el tobillo respecto al pie y la pierna [18].

- Cabeza del quinto metatarsiano, se ubica al pedir que el sujeto se pare en la punta del pie y palpando el borde externo del pie hasta encontrar el punto saliente mostrado en la Fig. 8.

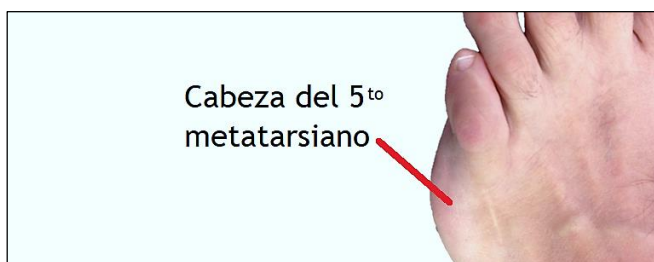


Fig. 8. Ubicación del quinto metatarsiano respecto a los dedos del pie [19].

Adicionalmente se coloca un marcador que esté alineado entre el trocánter mayor y la cabeza del peroné, por debajo de la mano extendida para evitar el solapamiento de las extremidades superiores que se balancean naturalmente mientras el sujeto camina.

Con los marcadores ya colocados, el sujeto de prueba debe colocarse de pie frente a la cámara 3 y lateralmente respecto a las cámaras 1 y 2. A continuación, se le solicitaba mirar al frente, y caminar con normalidad permitiendo que los brazos se balanceen con naturalidad siguiendo una trayectoria recta como se ilustra en la Fig. 9.



Fig. 9. Posicionamiento de las cámaras respecto al sujeto de prueba.

Los videos sincronizados acorde al posicionamiento de las cámaras, previamente explicado, permitieron el registro de las fases angulares realizadas sobre la marcha del sujeto de prueba desde diferentes perspectivas. Las cámaras detectaron el reflejo ocasionado por los marcadores de manera simultánea mientras los sujetos de prueba caminaban en el entorno controlado como se muestra en las Fig. 10, 11 y 12.



Fig. 10. Captura de video sincronizado por la cámara 1 (lateral al sujeto).

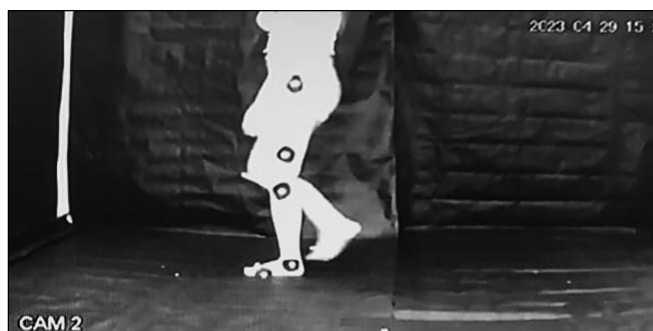


Fig. 11. Captura de video sincronizado por la cámara 2 (lateral al sujeto).



Fig. 12. Captura de video sincronizado por la cámara 3 (frontal al sujeto).

Posterior a la sesión de pruebas, se extraen en una memoria USB todas las secciones de videos sincronizados del grabador, posteriormente se convierten a formato MP4, para asegurar su compatibilidad con diferentes tipos de software que permitan el procesamiento de cada video individualmente.

C. Procesamiento del video

Para realizar el procesamiento de cada video, se utilizó el software de uso libre 'Kinovea' disponible en [20]. Se cargó cada video individualmente y se determinó el intervalo de tiempo en el que se identifica visualmente un ciclo de marcha completo. Enseguida, se usó la herramienta 'calibración de cámara' para configurar la corrección de distorsiones intrínsecas de cada cámara como se observa en la Fig. 13.

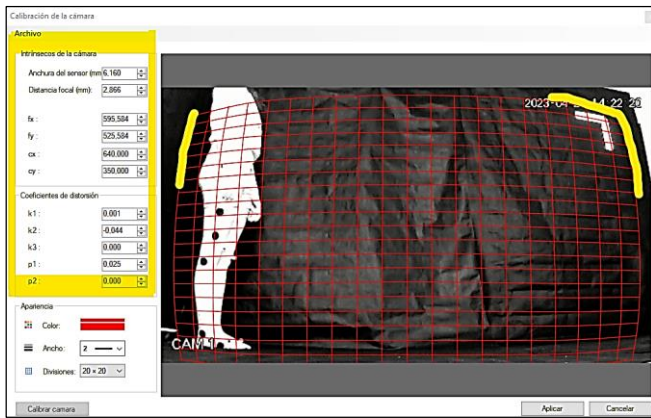


Fig. 13. Interfaz de la herramienta calibración de cámara..

A continuación, se trazó una línea horizontal coincidente con una marca referencial notable en el video y de la cual se conocía ya su dimensión real, con la función ‘calibrar’, se estableció como ‘línea que define el eje horizontal’ y se definió su dimensión para que el software tome todas las medidas considerando magnitudes reales y las curvaturas de distorsión, inherentes al video. Al terminar el proceso de calibración, se identificó el frame donde se iniciaba un ciclo de la marcha y con la herramienta ‘Ángulo’ se realizó una medición tomando como referencias a 3 de los marcadores de movimiento y se activó la función seguimiento. Seguidamente, se realizó una exploración cuadro por cuadro de cada frame del video para verificar que no existan desfases en la posición referencial de cada punto. En este último paso se efectuaron leves correcciones al seguimiento automatizado cuando fue necesario hasta terminar un ciclo de marcha, en la Fig. 14 se aprecia una captura del procedimiento.

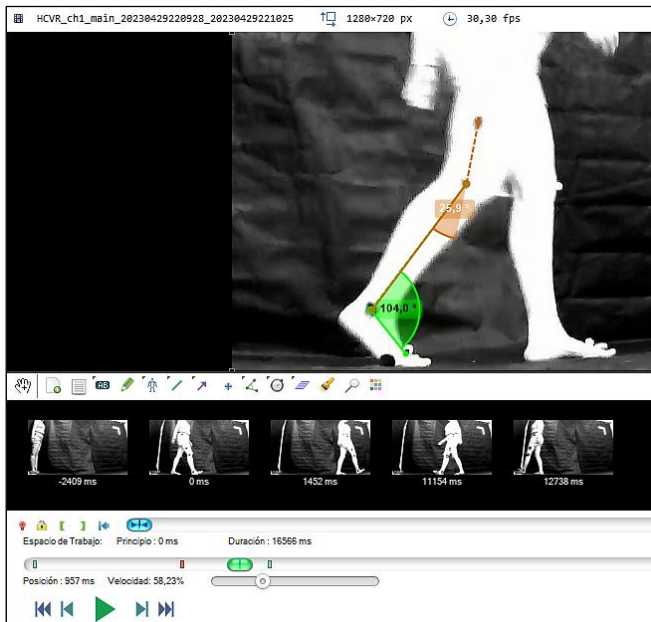


Fig. 14. Captura del procesamiento durante el seguimiento angular.

Finalmente, las trayectorias creadas en base a las lecturas angulares se pueden apreciar con la herramienta ‘Cinématica angular’, las mismas se pueden exportar en forma de arreglos lineales o datasets, a formato de Excel o JavaScript Object Notation (JSON) para su posterior representación y procesamiento. Se puede apreciar una captura de la interfaz y de una gráfica resultante del procesamiento en la Fig. 15.

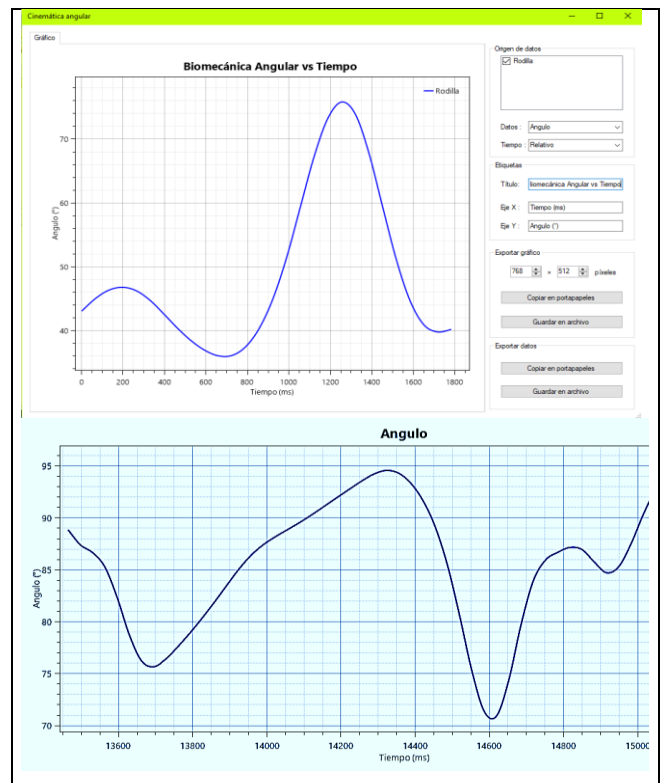


Fig. 15. Capturas de gráficas de biomecánica angular vs tiempo de rodilla (superior) y tobillo (inferior) obtenidas en procesamiento de video aleatorio.

III. RESULTADOS

Al finalizar el desarrollo del sistema, se verificó la eficiente integración de hardware y software al implementarlos con técnicas de videogrametría que permitieron adquirir y digitalizar señales de la biomecánica angular de las extremidades inferiores de dieciocho participantes, ocho mujeres y diez varones entre 18 y 60 años, que accedieron de forma voluntaria a ser grabados caminando con marcadores de movimiento en un ambiente controlado, para posteriormente cuantificar su marcha con un procesamiento offline, con la finalidad de facilitar una subsiguiente valoración por parte de fisioterapeutas especializados en análisis de la marcha humana.

Las bioseñales obtenidas se encuentran digitalizadas, cuantificadas y procesadas con herramientas del software Kinovea tal como se detalló en la sección anterior. A continuación se presentan, como resultados, las gráficas de la biomecánica angular en función del tiempo en milisegundos relativo a un ciclo de marcha. En las Fig.16 hasta las Fig. 33. se muestran de color rojo las extremidades derechas de cada participante y en azul las izquierdas. Las mediciones en las rodillas se muestran a la izquierda de cada figura mientras que las de los tobillos se han colocado a la derecha.

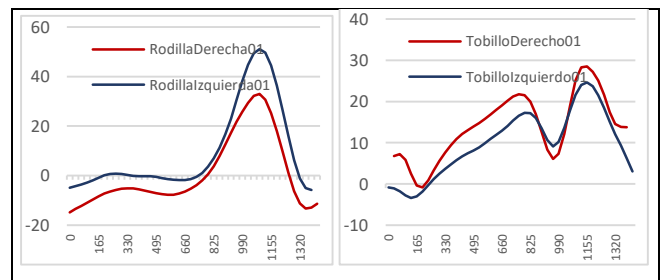


Fig. 16. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 1.

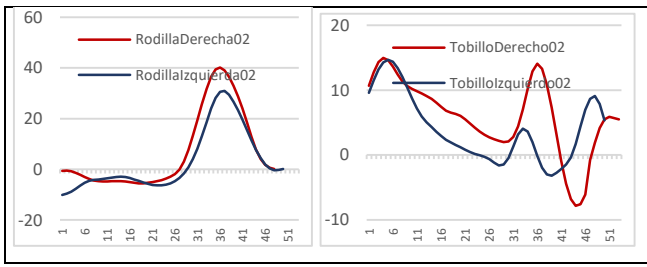


Fig. 17. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas Sujeto 2.

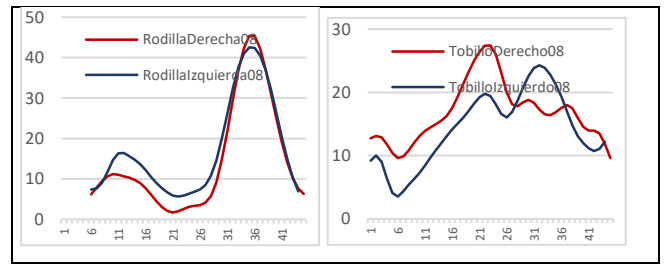


Fig. 23. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas Sujeto 8.

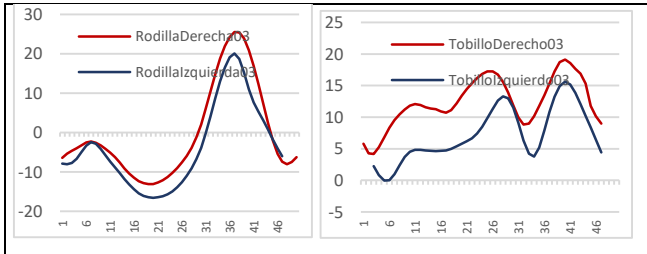


Fig. 18. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 3.

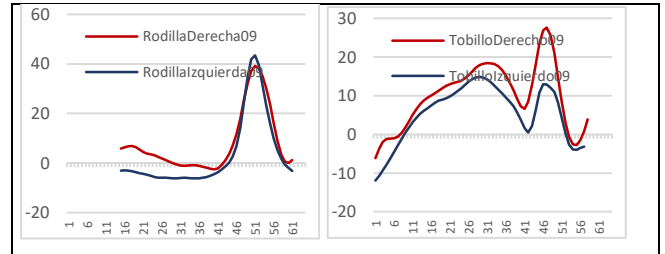


Fig. 24. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 9.

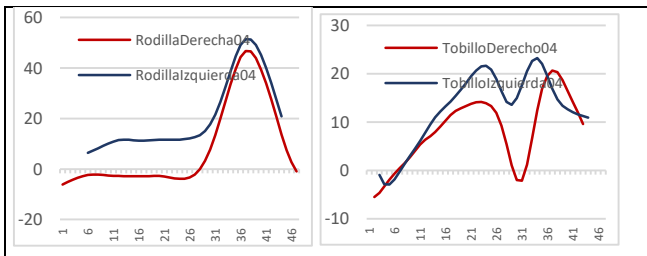


Fig. 19. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 4.

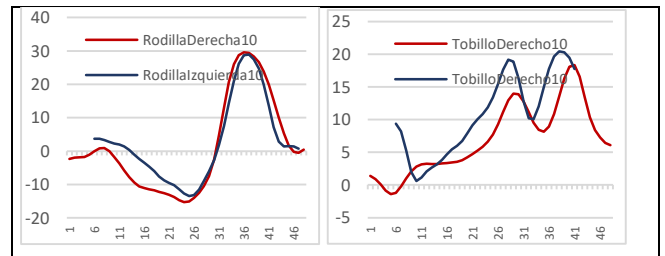


Fig. 25. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 10.

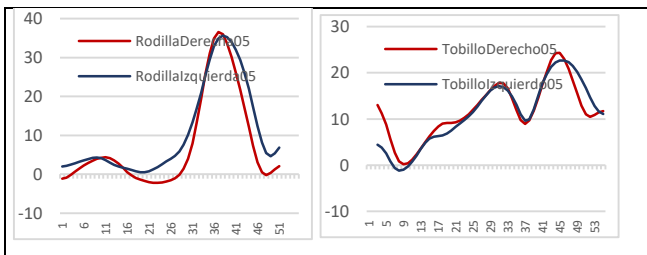


Fig. 20. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 5.

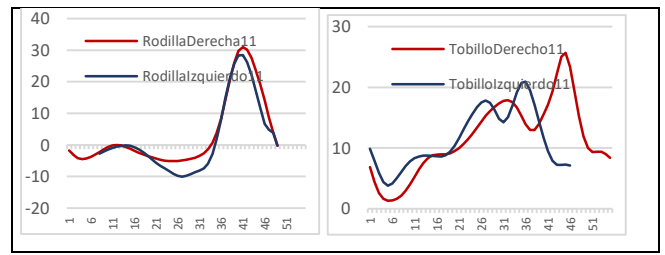


Fig. 26. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 11.

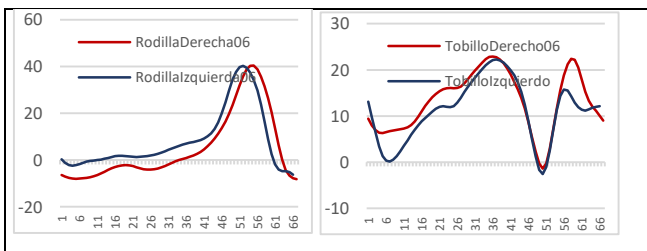


Fig. 21. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 6.

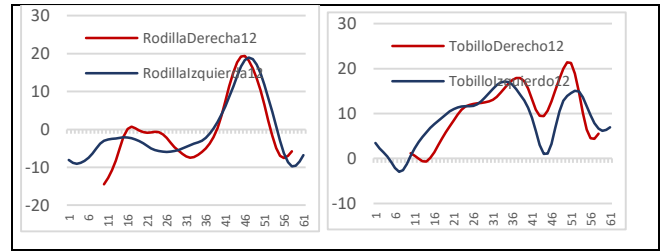


Fig. 27. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 12.

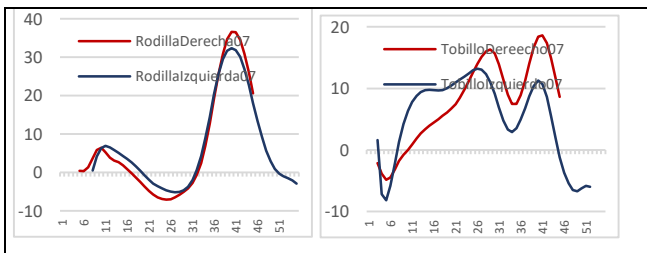


Fig. 22. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 7.

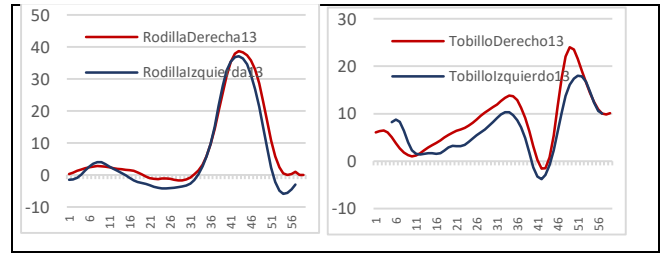


Fig. 28. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 13.

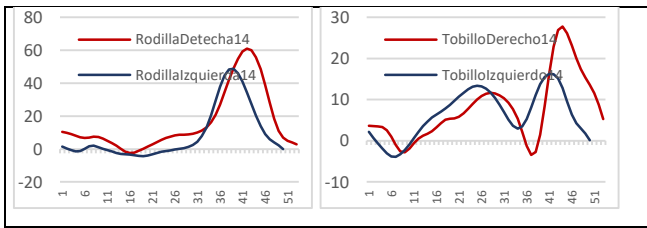


Fig. 29. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 14.

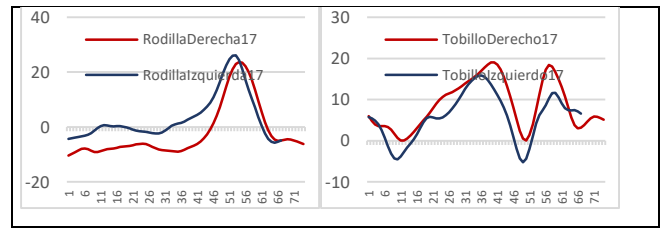


Fig. 32. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 17.

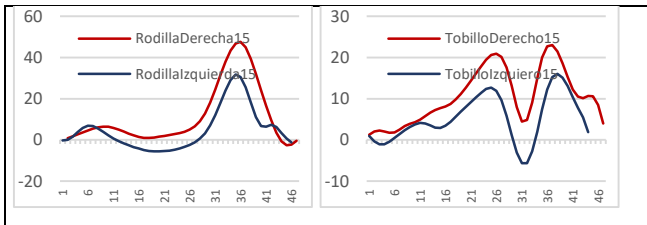


Fig. 30. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 15.

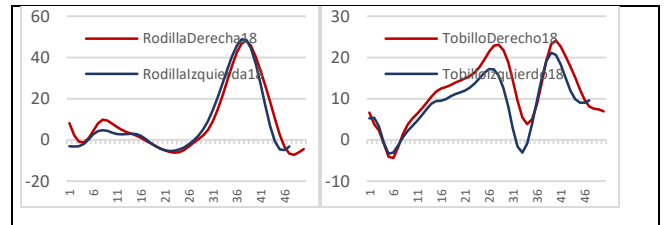


Fig. 33. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 18.

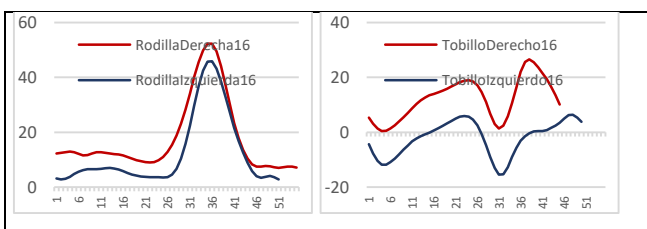


Fig. 31. Biomecánica angular en función del tiempo obtenidas del Sujeto 16.

Como valoración concluyente respecto a la eficiencia de los dispositivos implementados y técnicas aplicadas en el sistema propuesto, se realizó una comparativa entre ocho de las mediciones tomadas al azar entre las muestras obtenidas y se las comparó con las gráficas obtenidas del estudio [22], considerado como referencia. Se verificó la correspondencia en trayectorias de la biomecánica angular en función del tiempo y se expone la comparativa conjunta en la Fig. 34

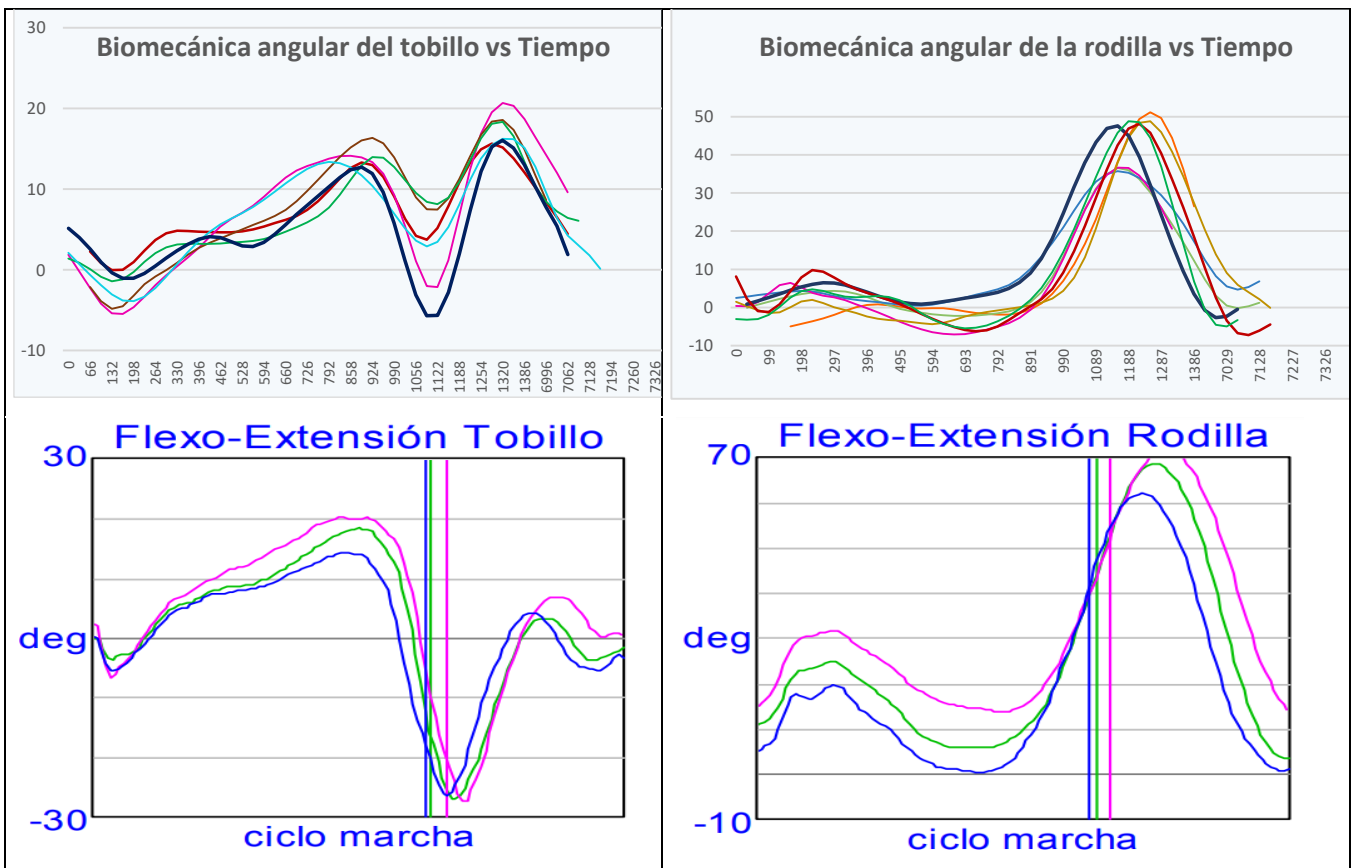


Fig. 34. Gráficas angulares en función del tiempo obtenidas con el sistema desarrollado, comparadas con las obtenidas en [13].

Tal como se aprecia en la Fig. 34. las medidas realizadas digitalmente con el sistema expuesto en este trabajo comparten patrones similares, dejando por sentado que el

sistema es lo suficientemente fiable para asistir en la evaluación de la marcha humana a profesionales de la salud.

En la Tabla I. se aprecia de forma detallada información, relevante para este estudio, de cada sujeto de prueba que participó en este estudio, misma que fue recopilada al momento en que se firmaron los consentimientos informados. Se especifica la edad en años, el sexo, la altura en metros, el peso en kilogramos, la hora de inicio y finalización de la grabación de prueba, la fecha de realización de la prueba y un apartado donde se menciona si el participante sufrió alguna lesión en las extremidades inferiores que se deba considerar

como relevante, por la posibilidad de que el patrón de marcha haya resultado alterado como consecuencia de la misma. Pese a que la interpretación de los resultados presentados no se corresponde con los objetivos de este trabajo, se incluye esta información para su potencial valoración por parte de especialistas del área de fisioterapia y ciencias afines.

Resalta de la información sintetizada en la Tabla 1, que diez de los dieciocho participantes manifestaron no presentar lesiones significativas previas a la sesión de prueba.

TABLA I. INFORMACIÓN SOBRE LOS PARTICIPANTES DE LAS SESIONES DE PRUEBA

Sujeto de prueba	Información física relevante para el estudio							
	Edad (años)	Sexo	Altura (metros)	Peso (Kilogramos)	Hora de inicio de la prueba	Hora de finalización	Fecha de la prueba	Lesiones
01	19	F	1,57	55	14:15	14:16	29-abr-23	Golpe por caída
02	21	M	1,75	61	14:40	14:45	29-abr-23	Caída de Moto
03	21	M	1,70	68	14:58	15:00	29-abr-23	Esguince de Rodilla
04	20	F	1,58	50	15:20	15:25	29-abr-23	No
05	30	M	1,72	77	14:36	14:38	29-abr-23	Sobrepeso
06	30	M	1,72	74	14:50	14:53	29-abr-23	No
07	31	M	1,73	65	19:14	19:20	29-abr-23	Carga de pesos en construcción
08	63	M	1,60	68	19:30	19:32	29-abr-23	No
09	60	F	1,45	54	19:45	19:48	29-abr-23	No
10	26	M	1,70	80	20:08	20:10	29-abr-23	No
11	31	M	1,67	64	20:25	20:27	29-abr-23	No
12	29	M	1,73	78	20:42	20:44	29-abr-23	No
13	37	M	1,70	68	20:58	21:01	29-abr-23	No
14	35	F	1,59	82	21:17	21:20	29-abr-23	Sobrepeso
15	22	F	1,61	66	21:33	21:36	29-abr-23	No
16	59	F	1,62	58	21:40	21:44	29-abr-23	Principio de artritis
17	60	M	1,67	70	21:56	21:59	29-abr-23	Golpe por caída
18	28	F	1,66	75	22:21	22:26	29-abr-23	No

IV. CONCLUSIONES

Al concluir el presente trabajo se encontraron una serie de observaciones y sugerencias que permitirían replicar el sistema presentado y mejorarlo minimizando los errores potenciales, que se detallan a continuación.

Para un correcto análisis cinemático con videogrametría se prefiere implementar cámaras cuyas características prioricen una mayor tasa de cuadros por segundo (FPS) contra la cantidad de píxeles, debido a que una mayor proporción de FPS evita el efecto 'blur' o difuminado de imagen fantasma.

Para determinar el valor de FPS adecuado en cámaras de alta velocidad se debe considerar el momento de desplazamiento con mayor velocidad y comprobar que la cámara pueda realizar capturas suficientemente nítidas en cada cuadro del video, esto permitirá que sea requerida mucha menos asistencia de ajustes manuales durante el procesamiento de los videos filmados.

Las métricas angulares medidas en las articulaciones determinadas a través del software pueden verse influenciadas

por diversos factores de error humano, por ejemplo, la incorrecta colocación de los marcadores, situación que en otros estudios similares también se presenta como una de las principales dificultades para la adquisición de la biomecánica angular, lo que complica un correcto análisis posterior de la marcha de cada sujeto.

Es recomendable generar un ambiente de confianza para cada participante y explicar detalladamente el procedimiento completo, haciendo demostraciones y ayudando a mentalizar una situación donde pueda caminar con naturalidad, de lo contrario, su marcha se verá seriamente modificada, en ritmo y forma, generando valores atípicos en su biomecánica angular.

Una correcta calibración de la cámara y líneas de referencia en el software Kinovea permitirá que, además del análisis angular, se habiliten funciones de análisis cinemático lineal, mediciones estáticas, así como dinámicas que pueden resultar extras muy útiles en el análisis de la marcha realizado por un especialista.

RECONOCIMIENTO

Se hace un reconocimiento y agradecimiento público a los docentes y estudiantes de la carrera de Fisioterapia de la Universidad de Cuenca, quienes aportaron con su experticia y conocimientos durante las sesiones de prueba de funcionamiento del sistema expuesto en este trabajo, así como por aportar con información actualizada sobre las herramientas, técnicas y procedimientos empleados a nivel local para evaluar la marcha humana.

REFERENCIAS

- [1] S. Hincapié y D. Muñoz Suárez, «Acercamiento a un diagnóstico fisioterapéutico: Análisis de marcha.» Revista Facultad Ciencias de la Salud, Universidad del Cauca, pp. 40-44, 2010.
- [2] A. Agudelo, T. Briñez, V. Guarín, J. Ruiz y M. Zapata, «Marcha: descripción, métodos, herramientas de evaluación y parámetros de normalidad reportados en la literatura.» CES Movimiento y Salud, pp. 29-43, 2013.
- [3] J. Cámara, «Análisis de la marcha: sus fases y variables espaciotemporales.» Entramado, 2011.
- [4] F. Martínez, «Desarrollo de un laboratorio de marcha con integración sincrónica mediante una arquitectura en módulos.» 2010.
- [5] F. Ferrari, J. Vera, M. Cordero, J. Rapallini y J. Osio, «Prototipo de laboratorio de marcha de bajo costo, análisis de la postura y el movimiento para diagnóstico e intervención terapéutica.» de IV Congreso Argentino de Ingeniería, Córdoba, Argentina, 2018.
- [6] M. Haro, «Laboratorio de análisis de marcha y movimiento.» Revista Médica Clínica Las Condes, pp. 237-247, 2014.
- [7] S. Perez, «Adquisición y análisis de señales electromiográficas durante la marcha.» 2018.
- [8] A. Villa Moreno, E. Gutierrez y J. C. Perez Moreno, «Consideraciones para el análisis de la marcha humana. Técnicas de videogrametría, electromiografía y dinamometría.» Ingeniería Biomédica, 2008.
- [9] M. H. Valencia y J. H. Osorio, «Caracterización de variables cinemáticas de la marcha humana mediante un sistema computarizado de captura de imágenes subacuáticas: parámetros angulares de rodilla.» Arch Med, 2013.
- [10] D. Rojano, A. Berrla, A. Molina, H. Moyo y F. Berral, «Análisis de video en dos dimensiones de la carrera y el salto vertical con cámaras de alta velocidad. Validez y fiabilidad: una revisión sistemática.» 2020.
- [11] M. Vollmer y K. Möllmann, «High speed and slow motion: the technology of modern high speed cameras».
- [12] K. Pérez, A. León, R. Salido. «Estudio comparativo de métodos para el análisis del movimiento en 2D: ventajas y desventajas del uso de marcadores». México 2017. Memorias del Congreso Nacional De Sociedad de Ingeniería Biomédica, 4(1), 294-297. <http://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/270>.
- [13] A. Villarroya, A. Alonso, M.A. Franco, N. Ramírez-Escudero, I. García, B. Calvo. «Sensibilidad a la colocación de los marcadores en el modelo convencional de análisis cinemático de la marcha». E.U. Ciencias de la Salud, Universidad de Zaragoza. Biomecánica, 15 (1), 2007, pp. 42-48. www.researchgate.net/publication/39434164.
- [14] Diaz, C. A., Toro, M. L., Forero, J. C., & Torres, A. (2011). «Detección, rastreo y reconstrucción tridimensional de marcadores pasivos para análisis de movimiento humano». Cinemed III - Detection, tracking and 3D reconstruction of passive markers for human gait analysis». Revista Ingeniería Biomédica, 3(6), 56-68. <https://doi.org/10.24050/19099762.n6.2009.77>.
- [15] www.salud.gov.ec/wp-content/uploads/2022/09/A.M.5316-Consentimiento-Informado_-AM-5316.pdf.
- [16] Ubicación del trocánter mayor en el fémur. Fig. 5. <https://www.emsdolorclast.com/es/indicaciones/sindrome-doloroso-del-trocantermayor>.
- [17] Ubicación de la cabeza del peroné, respecto a la rótula. Fig. 6 <https://www.delgadotrauma.com/cintilla-iliotibial>.
- [18] Ubicación del maleolo en el tobillo respecto al pie y la pierna. Fig. 7. www.eldiario.es/campobase/reportajes/fisioterapia/sindrome-tunel-tarso_1_4250669.html.
- [19] Ubicación del quinto metatarsiano respecto a los dedos del pie. Fig. 8 <https://aware.doctor/blog/guia-basica-del-quintus-varus/>.
- [20] www.kinovea.org.
- [21] K. Shah, M. Solan, E. Dawe. «The gait cycle and its variations with disease and injury. Orthopaedics and Trauma». 2020 Jun 153-60. www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877132720300397.
- [22] «Análisis del comportamiento temporal de variables fisiológicas y de esfuerzo en sujetos instruidos en la prueba de marcha de 6 minutos: complemento a la norma de la Sociedad Americana del Tórax». Fisioterapia, pp. 20-27, 2016.