

Sistemas de captura y análisis de movimiento cinemático humano: una revisión sistemática

Human motion capture and analysis systems: a systematic review

Lesly Lisbeth Gómez Echeverry¹, Anyi Melissa Jaramillo Henao², Madeleine Angélica Ruiz Molina³, Sandra Milena Velásquez Restrepo⁴, Camilo Andrés Páramo Velásquez⁵, Gabriel Jaime Silva Bolívar⁶

^{1,2}Bioingeniera, Investigadora de Biomecánica, Ergonomía y Confort

³Diseñadora Industrial, Instructora de Producción en Calzado y Marroquinería

⁴Magister en Ingeniería, Líder SENNOVA

⁵Diseñador Industrial, Gestor Tecnoparque Nodo Medellín

⁶Diseñador Visual, Instructor de Tecnología en Producción Multimedia

^{1,2,3}Centro de Diseño y Manufactura del Cuero, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA-, Grupo de Investigación BIOMATIC, Itagüí, Colombia

^{4,5,6}Centro de Servicios y Gestión Empresarial, Tecnoparque Nodo Medellín, Servicio Nacional de Aprendizaje -SENA-, Medellín, Colombia

Email: smvelasquez@sena.edu.co

Recibido: 14/03/2018

Aceptado: 20/05/2018

Cite this article as: L. L. Gómez Echeverry, A. M. Jaramillo Henao, M. A. Ruiz Molina, S. M. Velásquez Restrepo, C. A. Páramo Velásquez, G. J. Silva Bolívar, "Human motion capture and analysis systems: a systematic review", *Prospectiva*, Vol 16, N° 2, 24-34, 2018.

RESUMEN

El movimiento humano ha sido sujeto de numerosas investigaciones, principalmente en las ciencias biomédicas, ciencias del deporte y animación 3D. Dada la gran cantidad de tecnologías disponibles en el mercado, surge la necesidad de realizar una vigilancia tecnológica que determine sus principales ventajas y limitaciones, aplicaciones y situación actual de Colombia en cuanto a estudios que involucren este tipo de tecnologías. Para lograrlo, se realizó una revisión sistemática de literatura científica a nivel global, siguiendo los parámetros de las metodologías PRISMA y PRISMA P-2015. Se encontró que las tecnologías cinemáticas de análisis de movimiento se dividen en ópticos, inerciales y magnéticos, donde los sistemas ópticos reportan el mayor número de publicaciones, siendo la tecnología Vicon la más utilizada, debido al gran abanico de aplicaciones que presenta. En cuanto a Colombia, se evidencia poca participación en estos estudios, por lo que se debe fortalecer esta competencia tanto a nivel académico como empresarial.

Palabras clave: Cinemática del movimiento humano; Captura del movimiento; Animación 3D; Biomecánica; Calzado.

ABSTRACT

Human movement has been the subject of a large number of investigations, mainly within the biomedical sciences, sports science and 3D animation. Due to the large amount of available technologies in the market, a technological surveillance is necessary in order to establish the main advantages and drawbacks, applications and state of the art, considering studies on the use of technologies in Colombia. In this work, a literature review on these topics was performed following the standards of the PRISMA and PRISMA P-2015 methodologies. It was found that movement analysis technologies are divided between optical, inertial and magnetic, where the optical systems appeared to be the most reported. The Vicon technology is the most used, since it can be used in a high number of applications. Regarding Colombia, the literature review suggests that a low number of studies have addressed on the topic, hence the need to improve the proficiency at both academic and industrial levels.

Key words: Kinematics of human movement; Motion capture; 3D animation; Biomechanics; Footwear.

1. INTRODUCCIÓN

La medida de la cinemática humana ha sido la mayor fuente de investigaciones en áreas relacionadas con la medicina, ciencia deportiva e ingeniería biomédica [1]. Un uso adicional consiste en los principios de dinámica inversa para estimar las fuerzas que actúan dentro de las articulaciones y músculos [2]. Los sistemas para la captura de movimiento se componen por un hardware especial y software de procesamiento de datos [3].

El término Mocap (Motion capture o captura del movimiento) se refiere a aquellas técnicas de grabación de movimiento del cuerpo humano, que capturan datos espaciotemporales y se representan digitalmente. Entre sus aplicaciones se encuentran [4] los estudios para optimizar el rendimiento deportivo [5], en medicina para realizar análisis ortopédicos o para verificar procesos de rehabilitación [6, 7] y en animación 3D para aplicaciones en la producción de películas y juegos [3].

Mocap permite la captura de parámetros de movimiento lineales y coordenadas angulares, velocidades y aceleraciones para extremidades y articulaciones. El hardware Mocap depende en gran medida de la tecnología de captura de movimiento (marcador o sin marcador), y puede usar sensores con diferentes principios físicos: cámaras 2D/3D para detección óptica, sensores magnéticos con imanes permanentes y receptores de bobina para registrar cambios en el campo magnético, esqueletos mecánicos para rastreo directo de ángulos de articulación, o basados en sensores inerciales como acelerómetros y giróscopos [8].

Entre los procedimientos estandarizados para la captura detallada del movimiento del cuerpo se encuentran los sistemas ópticos estacionarios y portables [9,10], que consisten en una red de cámaras, usualmente infrarrojas, vídeo cámaras, sensores y marcadores (algunos sistemas no requieren marcadores) que convierten la información real en datos digitales para su tratamiento en entornos virtuales, calibradas entre sí en un espacio confinado o laboratorio [10]. Sin embargo, entre las limitaciones se encuentran las oclusiones de los marcadores al realizar ciertos movimientos o actividades. Por otro lado, la colocación de los marcadores en la piel requiere de una cantidad significativa de tiempo y del conocimiento de un experto [9].

Pueo y Jimenez [11] reportan que los métodos existentes para la captura del movimiento utilizan una variedad de técnicas, entre las que se incluyen sistemas con múltiples cámaras de vídeo que trabajan con luz infrarroja y sistemas con una única cámara con sensores adicionales para recuperar información de profundidad de la escena. El sistema óptico Mocap se basa en la captura

de imágenes 2D usando varias cámaras y encontrando un modelo 3D por triangulación con la ayuda de marcadores activo/pasivo o sin ellos [8]. Otros sistemas de captura están evolucionando con la incorporación de técnicas que no requieren de marcadores [12,13]. Estos se desarrollan a partir de controles de Microsoft Kinect y marcos de código abierto. Kinect, es un dispositivo de entrada de detección de movimiento desarrollado por PrimeSense y Microsoft para la consola de videojuegos de Xbox 360 y adoptado posteriormente para PC con Windows [3].

Los sistemas de medida inerciales IMU (Inertial Measurement Units) combinan acelerómetros, giróscopos, y magnetómetros (brújulas) y pueden resolver algunas de las cuestiones mencionadas con anterioridad. Los IMU pueden ser usados directamente sobre el cuerpo en segmentos específicos para deducir la cinemática de las articulaciones, sin sufrir el fenómeno de la oclusión, los datos pueden ser procesados y los sistemas son móviles, permitiendo las mediciones en campo. En comparación con los sistemas ópticos, la colocación de los sensores requiere menos tiempo y no requiere experticia en el proceso. A pesar de esto, las IMU presentan ciertas desventajas, como las limitaciones de realizar mediciones directas, característica que si se encuentra presente en los sistemas ópticos [9].

En Colombia, diversas entidades ofrecen a los organismos interesados el acceso a tecnologías para la captura de movimiento, útiles para el desarrollo de proyectos de cine, televisión, videojuegos, en estudios clínicos, biomecánicos o para fines pedagógicos. Instituciones como el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) a través de los tecnoparques, el Hospital Universitario de San José y empresas privadas como el Laboratorio de Biomecánica 3D, ofrecen el servicio de laboratorio para el análisis de movimiento con fines de diagnóstico y seguimiento de pacientes, algunos incluyen dentro de su oferta un enfoque deportivo adicional. En Antioquia este tipo de tecnologías se puede encontrar actualmente en instituciones como el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), la Fundación Universitaria María Cano, la Universidad CES y el Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM.

2. METODOLOGÍA

Con el propósito de identificar los artículos con mayor impacto, que mejor se ajusten a las necesidades de esta revisión y para reducir el riesgo de sesgo en la elección y recopilación de la información, se siguieron los lineamientos de la declaración PRISMA y PRISMA – P 2015 (Preferred Reporting Items for systematic reviews and meta-analyses for protocols 2015) [14,15]. Por la gran cantidad de resultados obtenidos, solo se incluyeron los estudios publicados en los últimos 5 años, con las ecuaciones de búsqueda descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda con antigüedad de los últimos 5 años.
Table 1. Search equations with 5 years of antiquity.

Ecuación de búsqueda	Fuente	Resultados
"Motion capture system" AND "biomechanics" AND "gait" AND "analysis" AND "photogrammetry"	Scholar Google	122
"Biomechanics" AND "motion analysis" AND "gait"	Scopus	435
"Motion capture system"	Patbase	158 patentes en 28 clúster
"Biomechanics" AND "motion analysis" AND "gait" AND Tipos de documento: (Article)	Web of Science	139
"Motion capture system" AND "footwear" AND "gait" AND Tipos de documento: (Article)	Web of Science	3
"Motion capture system" AND "human body" AND "sensor" AND Tipos de documento: (Article)	Web of Science	9
"Motion capture system" AND "biomechanics" AND "sensor" AND Tipos de documento: (Article)	Web of Science	7
"Motion capture system" AND "gait" AND "mocap" AND Tipos de documento: (Article)	Web of Science	1
"Motion capture system" AND "3D animation"	Scholar Google	341

Para la definición de la pregunta de investigación, se aplicó la nemotecnia PICO, que consta de 4 componentes: la población relevante, la intervención de interés, contra quién o qué se compara la intervención y los desenlaces. Por lo tanto, la pregunta de investigación es: ¿cuáles son las tecnologías disponibles actualmente (comparación) para analizar el movimiento (intervención) humano (población relevante) que permitan realizar estudios biomecánicos con alto grado de exactitud, además de obtener aplicaciones en el área de animación 3D (desenlaces)?

Luego se establecieron los criterios de inclusión y exclusión de publicaciones, donde se incluyeron resultados relevantes con respecto a la captura del movimiento para su aplicación en el área de animación y biomecánica. Se consultaron estudios en inglés y español, y se excluyeron los estudios y publicaciones considerados como "literatura gris", aquellos que tienen como enfoque principal el desarrollo del software para la captura y procesamiento de la información y los que intervienen el análisis cinético de la marcha.

Para el análisis de las publicaciones seleccionadas, primero se tabularon y resumieron los apartados de las publicaciones seleccionadas y todos sus aspectos metodológicos. En segundo lugar, se determinaron sus aplicaciones, tipos de sistemas de captura del movimiento y los parámetros biomecánicos analizados. En tercer lugar, se contó el número de publicaciones y se categorizaron según su enfoque. Por último, se resumieron los principales hallazgos para cada publicación.

Finalmente, se evaluó la calidad de las publicaciones seleccionadas estableciendo una puntuación para medir el nivel de evidencia para cada publicación. La puntuación se basó en la metodología utilizada por Sagawa y col. [16], en donde los estudios se clasificaron como tipo A, con puntajes entre 6 y 8, tipo B con puntaje entre 4 y 5 y tipo C con puntuación entre 2 y 3.

Se determinaron 8 criterios para evaluar el nivel de evidencia de cada publicación. Se descartaron las publicaciones que tuvieron puntajes entre 0 y 1. Los criterios

de evaluación son: 1. Año de publicación de al menos 2013, 2. Publicación en revista indexada (Nacional o internacional), 3. Publicación de patente, 4. Aplicación de interés para el SENA (Biomecánica, ergonomía, calzado y Animación 3D), 5. Publicaciones que no sean de "literatura gris", 6. Estudios que presenten resúmenes con información implícita sobre el planteamiento del problema, justificación, objetivos, metodología y principales hallazgos, 7. Estudios con metodología bien definida y estructurada y 8. Estudios con resultados que indican un alto componente de análisis de los mismos.

Por lo tanto, la puntuación máxima posible fue de 8, con un puntaje de 1 para el cumplimiento de cada criterio y 0 en caso contrario. Finalmente, se designaron 3 evaluadores de las publicaciones para evitar desacuerdos en los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las ecuaciones de búsqueda se produjeron en total 1.215 resúmenes a través de las bases de datos y de patentes. Luego se aplicó el diagrama de flujo de la figura 1 para la selección de las publicaciones. La figura 2 presenta los principales hallazgos de las publicaciones seleccionadas.

Figura 1. Diagrama de flujo para elección de artículos y patentes.
Figure 1. Flowchart for selection of papers and patents.

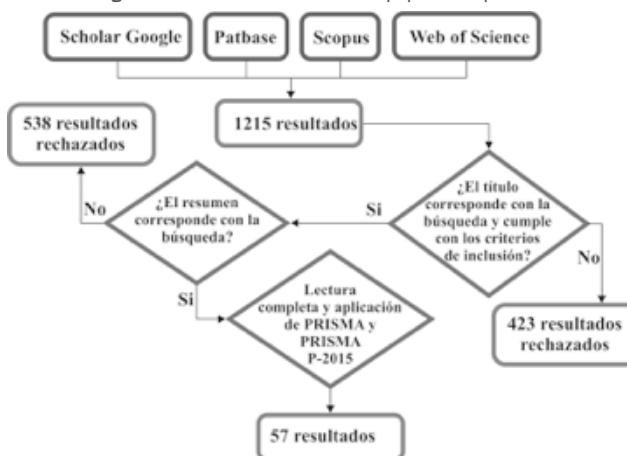
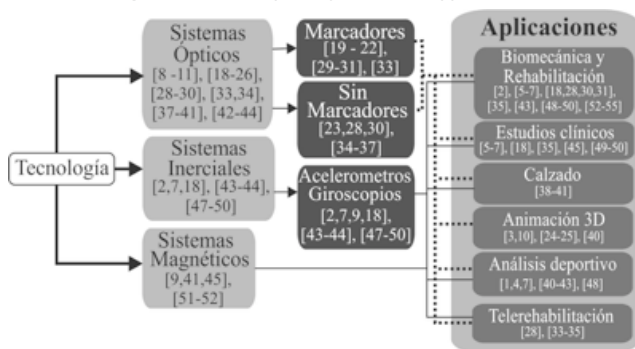


Figura 2. Sistemas de captura del movimiento y sus aplicaciones.
Figure 2. Motion capture systems and applications.



En la plataforma PatBase se encontraron 158 patentes relacionadas con sistemas de captura de movimiento, divididas en 28 clúster. Las tecnologías prevalentes para el análisis del movimiento humano fueron los sistemas ópticos, inerciales y magnéticos. Frecuentemente estas tecnologías son usadas junto con otros desarrollos como sistemas de realidad virtual o aumentada y dispositivos portables (wearables). Entre sus principales aplicaciones se encuentran los análisis biomecánicos, estudios clínicos [17], rehabilitación, animación multimedia para producciones audiovisuales y rendimiento deportivo. Las tecnologías para el análisis de movimiento se dividen a su vez, de acuerdo al tipo de dispositivo que usen para medir el desplazamiento y la ubicación de las articulaciones.

3.1 Sistemas de captura del movimiento ópticos

Entre los sistemas basados en visión, cuyo uso se ha generalizado, se encuentra Vicon, Qualysis, Codamotion, Motek, Biometrics, ETB Gaitsmart y Microsoft Kinect [18]. En un Mocap basado en marcadores, el conjunto de cámaras se calibra para rastrear el movimiento de estos, que pueden ser reflectantes (marcadores pasivos) [19,20] o auto iluminados (marcadores activos) [21]. Dado que el número de marcadores es limitado, encontrar correspondencias entre marcadores en diferentes cámaras se convierte en un problema trivial. Debido a las ventajas en la segmentación de marcadores y la búsqueda de correspondencia, los sistemas ópticos de captura de movimiento basados en marcadores suelen ser robustos [22]. Estos sistemas son configurados desde parámetros de control que manejan coordenadas en tres dimensiones (3D), para medir objetos volumétricos [10]. Existen aplicaciones específicas como las de reconcomiendo facial, que son muy utilizadas en el desarrollo para animaciones audiovisuales (videojuegos, efectos especiales, cine, entre otros) donde no existen puntos estandarizados para la colocación de dichos marcadores [22].

Debido a las limitaciones en cuanto a precisión y fiabilidad en la captura de movimiento sin el uso de marcadores, evidenciado principalmente en las reconstrucciones tridimensionales, generalmente se opta por el uso de marcadores. Sin embargo, Sandau y col. [23], logra-

ron reconstruir modelos 3D altamente detallados a partir de la configuración de 8 cámaras, utilizando un enfoque de visión estereoscópica. El modelo resultante presenta 3 grados de libertad de rotación y 3 de traslación para cada segmento de extremidad, sin restricciones en el rango de movimiento. Haciendo el comparativo con sistemas que utilizan marcadores, se comprobó una alta similitud entre ambos métodos, pero poca fiabilidad en las rotaciones internas/externas, abducción/aducción de rodilla e inversión/eversión del tobillo [23].

Alrededor del tema de realidad virtual con aplicación a la captura del movimiento, se han encontrado varias patentes que se basan en sistemas que proporciona un volumen escalable, en el cual los participantes pueden moverse libremente y asumir posiciones arbitrarias, mientras les transmiten señales de audio y video mediante dispositivos de renderización para sumergirlos en un entorno virtual [24]. Este sistema se puede aplicar en el desarrollo de videojuegos, programas de aprendizaje, cine y televisión [10].

Se han fabricado “teatros de realidad virtual” que poseen una red de visualización estereoscópica y sistemas de captura del movimiento para coordinar el contenido teatral de manera tal que los usuarios logren una experiencia más estimulante durante su estancia en el teatro [25].

La captura del movimiento 3D de un objeto a partir de dispositivos sensoriales y la formación de imágenes en escena en tiempo real es algo que se puede encontrar en la actualidad comercialmente, en donde se utilizan dispositivos portátiles capaces de presentar al usuario la información en imagen aumentada virtualizada [26].

En el contexto instructivo del Centro de Servicios y Gestión Empresarial, el sistema Mocap óptico representa un medio tecnológico para el desarrollo de estrategias educativas en los programas de producción de medios audiovisuales digitales y diseño de videojuegos. Los dispositivos de realidad virtual y aumentada se pueden emplear en los procesos enseñanza – aprendizaje del SENA, donde el impacto generado al utilizar estas tecnologías proporciona una mejor reminiscencia en los aprendices. Además, permite fortalecer eventos de divulgación empresarial, académica e investigativa a través de pasarelas de moda en Calzado y Marroquinería del Centro de Diseño y Manufactura del Cuero.

En cuanto a las aplicaciones en biomecánica, estudios clínicos y rehabilitación, se han encontrado estudios como los de Ye y col. [27], que desarrollaron un nuevo marco de referencia de bajo costo para el análisis de la marcha, utilizando sensores MS Kinect. Además evaluaron la eficiencia de este marco de referencia por medio de una comparación con las cámaras comerciales Vicon, encontrando un error de medida de 1.75% en la detección de eventos de la marcha [27].

La investigación realizada por Fry y col. [32], desarrollaron un método para calcular a partir de los sistemas Mocap las fuerzas de reacción con el suelo, sin necesidad de las plataformas de fuerza. Los resultados indicaron que las fuerzas de reacción con el suelo pueden ser derivadas con precisión desde estos sistemas. Adicionalmente, los datos fueron fácil y rápidamente analizados usando un software personalizado [32].

Con el propósito de analizar la influencia del zapato en el movimiento del pie, se han realizado estudios de análisis de movimiento a partir de Mocap [36-38]. Sin embargo, al ubicar los marcadores sobre el zapato, los datos se distorsionan y se pueden ocultar algunos de ellos. Por ello, Halstead y col. [39], rediseñaron un zapato, de tal manera que permitiera remover algunas secciones de material del contrafuerte y la capellada para acomodar en esos lugares los marcadores de piel y obtener así una mayor precisión en las medidas [39].

Aunque el principal sistema de captura del movimiento es el Vicon, debido a su alto costo, se han venido buscando alternativas más económicas con un alto grado de precisión y exactitud [29].

Mentiplay y col. [28], y Eltoukhy y col. [29], estudiaron la cinemática de la marcha de la tecnología de Microsoft Kinect V2 y la compararon con los sistemas ópticos basado en marcadores 3DMA y BTS respectivamente. Se encontró que aunque el sistema para el análisis de movimiento Kinect V2 es una herramienta que puede resultar apropiada para medir parámetros espaciotemporales de la marcha como la velocidad, el ancho, largo y tiempo del paso y la velocidad de oscilación del pie, los parámetros como la flexión de tobillo, rodilla y la cadera, máxima abducción de la rodilla y máxima oscilación de la rodilla, resultaron no ser válidos para [28] y válidos con un nivel de confianza del 90% para [29]. Algunos estudios indican que el sistema Kinect V2 puede utilizarse como herramienta de retroalimentación en tiempo real de poblaciones patológicas con alto riesgo de lesiones [29, 30].

Es claro pues, que aunque el sistema Kinect V2 entrega resultados aproximados a sistemas más sofisticados como BTS y 3DMA, no puede ser considerado como un sustituto apropiado para estas tecnologías.

Aunque los sistemas ópticos analizan el movimiento humano con precisión, se ha encontrado que no reportan buenos resultados en estudios complejos, como las investigaciones que analizan la biomecánica del retro-pié, esto debido a las dificultades que existen para diseñar modelos que consideren cada uno de los huesos que compone el pie de manera individual. Debido a estas imprecisiones, generalmente este tipo de estudios no se deben realizar con sistemas de captura ópticos [31].

En la telerehabilitación también se pueden emplear sis-

temas de captura de movimiento de bajo costo, precisos y portátiles [33-35]. Un sistema puede consistir en una cámara de profundidad portátil y precisa y softwares con algoritmos de procesamiento de señales que determinen patrones de movimiento de interés a partir de datos infrarrojos y de profundidad. El pie es una de las estructuras más complejas de modelar cuando es comparado con los demás segmentos corporales. Samson y col. [35], desarrollaron un sistema portátil para analizar la cinemática del pie y la dinámica de la marcha sin que el usuario o paciente tenga que desplazarse hasta el laboratorio. Los resultados de este estudio fueron comparados con un sistema Vicon. Aunque encontraron que el sistema Vicon es más preciso, la exactitud y precisión del sistema portátil fueron más satisfactorias en el uso de la mayoría de aplicaciones para el análisis del pie fuera del laboratorio (por ejemplo, la práctica fisioterapéutica y en el hogar del paciente). El sistema portátil presentó un rendimiento satisfactorio para evaluar las deformidades más comunes del pie, donde se conoce la variabilidad entre grupos (por ejemplo, sujetos sanos vs. patológicos) [35].

Los sistemas Mocap juegan un papel importante en los métodos para el cuidado de la salud y el entrenamiento deportivo. Se encuentran aplicaciones en el deporte, como los estudios que buscan realizar plataformas de realidad virtual para el entendimiento de los gestos deportivos [40]. También existe una gran demanda de sistemas Mocap portátiles que permitan a las personas controlar su estado de salud y practicar posturas deportivas adecuadas. En este sentido, los sistemas Mocap ópticos requieren una configuración especial, lo que dificulta su aplicación en sistemas móviles [41].

Un caso específico de ineficiencia del sistema Mocap óptico se reporta en el análisis de los deportes acuáticos, ya que este tipo de tecnologías presenta dificultades producto de la instalación, calibración y procesamiento de datos bajo el agua, el campo de visión se limita debido a las turbulencias, refracciones de luz y error de paralaje y los análisis fuera del área de toma de datos retrasan la realimentación prevista para el paciente/atleta [42].

3.2 Sistemas de captura del movimiento inerciales

En los últimos años, los sistemas de captura de movimiento inerciales IMU (unidades de medición inerciales) han sido investigados como una alternativa para medir la cinemática humana, ya que funcionan como un sistema de sensor activo que permite mediciones fuera de un ambiente experimental y calculan la rotación de segmentos corporales [43]. Los IMU son una combinación de giróscopos que miden las velocidades angulares alrededor de un sistema de coordenadas de un sensor, magnetómetros que miden el campo magnético de la tierra y acelerómetros que miden la aceleración gravitacional y traslacional [44]. Los IMU son estratégicos para el análisis del movimiento humano, debido a su

portabilidad, fácil manipulación y gran exactitud en la información cinemática capturada [45]. Los sistemas IMU requieren de una gran cantidad de cálculos y algoritmos para ejecutar la estimación de su orientación [46].

Algunos autores como Pasciuto y col. [47], se han concentrado en estudiar la influencia sobre la exactitud en la medición de la orientación de los giróscopos cuando estos son expuestos a perturbaciones y la influencia del cálculo de la velocidad angular en dicha alteración. Estos encontraron que los errores como la desviación constante, factor de escala, ruido blanco e inestabilidad de polarización, afectan directamente el cálculo de la orientación del giróscopo y que la sola relación entre la velocidad angular y el ruido no puede usarse para representar la precisión con la que se puede estimar la posición [47]. El mayor inconveniente con los sistemas inerciales radica en la deriva que resulta del cálculo de los ángulos de rotación obtenidos de los giróscopos debido a una combinación de errores como son el sesgo en la medición, uso de sensores no ortogonales y pérdida de información que depende de la tasa de muestreo configurada para el sistema. En cuanto a los acelerómetros, su tratamiento matemático consiste de una integral doble para el cálculo del desplazamiento que conduce a graves errores [2]. Los IMU muestran una divergencia cinemática si se comparan de manera directa con los con los sistemas ópticos debido a una variedad de problemas como la deriva, el movimiento de la piel debido a la activación muscular y posibles perturbaciones del campo magnético [2].

Dentro de sus aplicaciones se encuentran la capacidad de capturar el movimiento humano para la realización de estudios en salud, deportes, rehabilitación y ergonomía [7,48].

El uso de los IMU en aplicaciones médicas es útil en el análisis de movimiento de segmentos corporales, como por ejemplo durante la ejecución de cirugías en articulaciones [18]. Con los IMU se han desarrollado dispositivos accesibles y portables para el análisis cinemático de las articulaciones [18]. Estos sistemas han sido utilizados para el análisis de la marcha patológica, como es la de usuarios con enfermedades como Parkinson [49]. Además, una aplicación clínica de los IMU consiste en un análisis de movimiento durante la marcha, transferencia sentado y a parado, y dando un paso y saltando en pacientes con Osteoartritis de rodilla sometidos a artropatía total de rodilla, demostrando capacidad para discriminar el rango de movimiento en los planos sagital y frontal [50].

3.3 Sistemas de captura del movimiento magnéticos

Los sistemas magnéticos se están utilizando cada vez más debido a sus características de portabilidad que permiten obtener mediciones fuera del laboratorio, como es el caso de los estudios deportivos [43], aunque no se consideran confiables en aplicaciones que

requieren un alto grado de precisión [51]. En el análisis de la marcha, se han registrado consistencias con otros sistemas de captura más precisos en cuanto al análisis de la cadencia de la marcha y cinemática de las articulaciones del tobillo y rodilla, pero menor concordancia con los registros de parámetros espaciotemporales para la articulación de la cadera. Por lo tanto, estos sistemas se pueden considerar como intercambiables en cuanto al análisis de la cinemática de las articulaciones, exceptuando la cadera [52].

Se han reportado estudios que indican que los sistemas de captura del movimiento magnéticos proporcionan información cuantitativa de análisis biomecánicos comparables con los datos arrojados por otros sistemas de captura más costosos y voluminosos y no requieren de una preparación tediosa del área de estudio gracias a su portabilidad. Dentro de sus aplicaciones se encuentran los estudios clínicos y deportivos que involucren toma de datos bajo el agua. Esta tecnología permite mapear los campos magnéticos e identificar el mejor volumen para la prueba de adquisición experimental con una alta precisión (menor a 5°) [45].

3.4 Otros sistemas de captura del movimiento

Se han implementado otros sistemas de captura y análisis de movimiento, que, aunque son poco usuales, reportan buenos resultados. Tal es el caso de la fluoroscopia, que se ha convertido en un medio para rastrear la posición y orientación de la anatomía del pie y del tobillo [53]. Entre los modelos cinemáticos reportados por la literatura se tiene el desarrollo de un hardware para utilizar la fluoroscopia en un solo plano, y así cuantificar la cinemática sagital de talocrural y subtalar in vivo durante la marcha [53]. La fluoroscopia biplanar propuesta por Cross y col. [54], buscó cuantificar la exactitud y precisión de este sistema para el seguimiento *in vivo* de la marcha humana. Se obtuvo una técnica de estudio no invasiva que mide el movimiento dinámico de la articulación del retropié con gran exactitud, mientras soporta cargas [54].

Otra técnica que se ha implementado en los últimos años es la de ultrasonido, que permite entender mejor las condiciones musculo-esqueléticas durante los análisis cinemáticos de las articulaciones, obteniendo resultados fieles a la anatomía ósea y por medio de un sistema de seguimiento y análisis asistido por computador (CAT y MAUS) se describe correctamente la biomecánica de las articulaciones [55].

Una vez analizadas las características de los diferentes sistemas de captura del movimiento, se determinó que cada uno presenta fortalezas en y debilidades según su aplicación. Para visualizarlo mejor, se presenta la tabla 2.

Tabla 2. Características de los sistemas de captura del movimiento Mocap.
Table 2. Characteristics of motion capture systems Mocap.

Tecnología	Fortalezas	Debilidades
Sistemas ópticos con marcadores (sistemas líderes: Vicon y BTS)	*Precisión *Procesamiento datos *Animación 3D *Realidad virtual y aumentada *Abarca gran cantidad de aplicaciones *Estudios de alta complejidad	*Tiempo de adecuación del espacio y el Sistema *Costo del equipo *Sistema robusto *Oclusión de marcadores *Estudios deportivos *Espacio delimitado
Sistemas ópticos sin marcadores (Sistema líder: Kinect)	*Costo *Fácil manipulación *Procesamiento de datos *Precisión en parámetros espaciotemporales *Telerehabilitación	*Precisión en parámetros angulares *Estudios de alta complejidad
IMU y sistemas magnéticos	*Estudios deportivos *Portabilidad *Fácil manipulación *Realización de estudios fuera del laboratorio *Costo del equipo	*Precisión *Estudios de alta complejidad

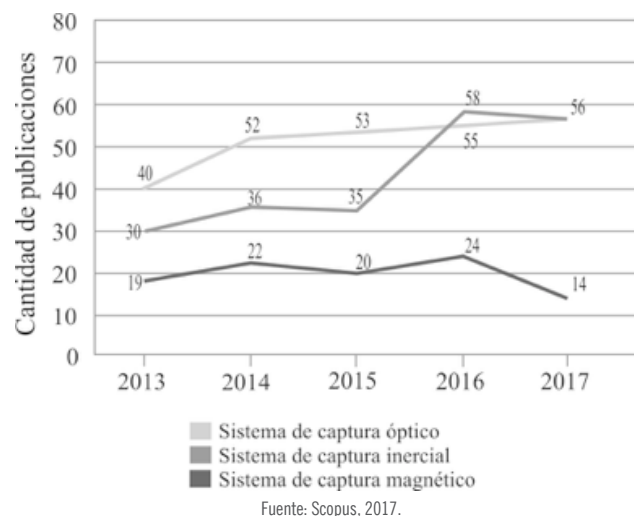
Los sistemas ópticos son realmente útiles en aplicaciones como animación 3D y estudios clínicos, biomecánicos y de rehabilitación de alta complejidad. Aunque presentan inconvenientes con la oclusión de los marcadores y el movimiento de los mismos en la piel, siguen reportando mejores resultados que los sistemas sin marcadores, como el Kinect, que aún no tienen definido algún estándar para la toma de medidas [49]. Este último se puede utilizar para aplicaciones que requieran un menor grado de exactitud sin dejar de ser fiables. En el caso de análisis en espacios abiertos y sin restricciones de movimiento, como es el caso de la mayoría de prácticas deportivas, la mejor opción son los sistemas inerciales y magnéticos, aunque su precisión no es comparable con los sistemas ópticos.

Los sistemas Vicon se consideran un patrón de referencia en el análisis óptico de la marcha por su alta precisión y gracias a su sistema de rastreo de la persona [49] se minimiza la problemática de las oclusiones. Debido al costo del equipo, volumen de captura de movimiento específico, limitación de espacio y a la necesidad de requerir personal especializado [50], este sistema no resulta viable para estudios rutinarios, sino que su uso se restringe a estudios de alto grado de complejidad.

3.5 Análisis estadístico para los sistemas de captura de movimiento: óptico, inercial y magnético

A partir de la búsqueda de información a nivel mundial alrededor de los sistemas de *captura de movimiento*, se traen a colación los aportes en investigación desde la base de datos Scopus, 2017. Allí se encontraron con la ecuación de búsqueda *"Motion Capture" AND "optical"* 256 resultados de publicaciones científicas. Del mismo modo con la ecuación de búsqueda *"Motion Capture" AND "inertial"* se obtuvieron 215 resultados y con la ecuación *"Motion Capture" AND "magnetic"* se obtuvieron 100 resultados.

Figura 3. Publicaciones por año de los Sistemas de Captura del Movimiento.
Figure 3. Publications per year of Motion Capture Systems.



Para el sistema de captura de movimiento óptico, este representa el mayor número de publicaciones promedio en los últimos 5 años, evidenciándose una curva de crecimiento tendiente a ser constante. Para el sistema de captura de movimiento inercial se encontró un incremento importante de investigaciones admitidas para los dos últimos años. Finalmente, se presentan menor número de investigaciones relacionadas con los sistemas de captura de movimiento magnético, en comparación con los otros sistemas.

Los sistemas ópticos tienen un desarrollo consolidado y proporcionan una precisión comprobada. Sin embargo, tienen como inconveniente que requieren un espacio y ambiente controlado, especialmente en cuanto a la iluminación, y un número variable de cámaras que dependerá del área del cuerpo monitoreado y del número de actores simultáneos a capturar. Aunque la precisión de dichas cámaras es alta (del orden del 1% de la me-

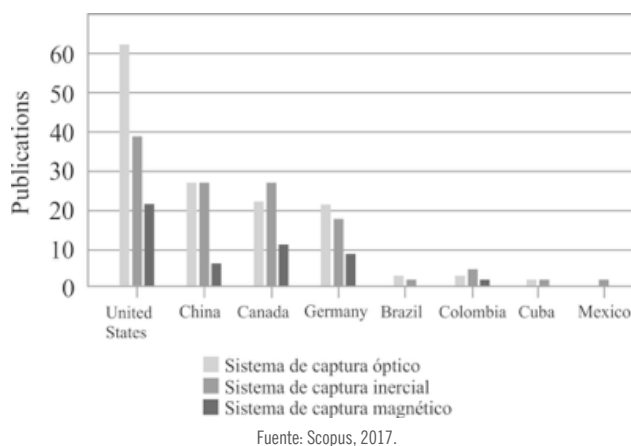
didada tomada), el problema derivado de la oclusión de marcadores reflectivos por otras partes del cuerpo del actor, otros actores en la escena, objetos o dispositivos que el actor tenga en la mano o que hagan parte de la escena, hace que se requieran un mayor número de cámaras o un trabajo de post procesamiento importante para recrear el movimiento de los actores [56].

Los sistemas inerciales por otro lado, son generalmente más económicos y requieren menos infraestructura. Pueden ser usados en tiempo real con la ayuda de dispositivos de recepción de señales para procesamiento de datos o una memoria interna. Tienen el inconveniente de la reducción en la precisión con la presencia de campos magnéticos y por errores de integración [56].

En cuanto a los centros de investigación que han aportado mayor producción bibliográfica asociada con los sistemas de captura del movimiento, especialmente desde Colombia, se encuentran en la tabla 3.

La tabla 3 revela los principales centros de investigación que han hecho aportes científicos en la materia de sistemas de captura de movimiento. En Scopus, la Universidad Eafit de Colombia es la única universidad latinoamericana que reporta estudios empleando sistemas de captura ópticos, ubicándose en el lugar 81 de un total de 130 organizaciones a nivel mundial. En cuanto a los sistemas inerciales, las universidades colombianas Universidad Antonio Nariño, con el puesto 27, y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el puesto 87, constituyen los únicos organismos latinoamericanos que han hecho aportes de un total de 170 organizaciones a nivel mundial. Finalmente, en los sistemas magnéticos de captura de movimiento no se reporta participación latinoamericana dentro de la estadística, de un total de 160 organizaciones a nivel mundial. Los países que lideran las publicaciones que utilizan los diferentes sistemas de captura del movimiento, incluyendo aquellos latinoamericanos, se aprecian en la figura 4.

Figura 4. Publicaciones por país.
Figure 4. Publications per country.



A nivel mundial existe una gran diferencia entre los países que aportan al desarrollo de la ciencia y la tecnología en la materia de sistemas de captura de movimiento. Como se aprecia en la figura 3, Estados Unidos constituye la mayor contribución en esta área, mientras que en una escala menor se encuentra China, Canadá y Alemania. Brasil y Colombia figuran en el puesto 22 y 23 respectivamente y Cuba en el número 33 en los sistemas de captura ópticos, de un total de 38 países objeto de estudio; mientras que para los sistemas inerciales Colombia se ubica en el puesto 19, Brasil en el 25, Cuba en el 27 y México en el 32, de un total de 39 países, y para los sistemas magnéticos Colombia se ubicó en el lugar 19.

Por tipo de documento, se evidenció que la mayor cantidad de publicaciones para los sistemas de captura del movimiento corresponde a los artículos resultados de investigación, con porcentajes sobre el 90%, seguido de artículos de prensa con una participación promedio de 4%, revisiones con un 1%, libros y capítulos de libros con 1%. En definitiva los artículos constituyen el medio más relevante para la divulgación de resultados de investigación.

Tabla 3. Afiliación de las publicaciones.
Table 3. Affiliation of publications.

Centro de Investigación	Publicaciones en los últimos 5 años	Sistema de captura del movimiento
Centre National de la Recherche Scientifique CNRS	6	Óptico
University of London Queen Mary	6	
University of Wisconsin Madison	6	
Universidad Eafit (publicación colombiana)	2	Inercial
Ecole Polytechnique Federale de Lausanne	6	
Universidad Antonio Nariño (publicación colombiana)	3	
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (publicación colombiana)	3	Magnético
Artanim Foundation	8	
Universite de Geneve	6	
Rive Droite Radiology Center	5	

Fuente: Scopus, 2017.

Finalmente, realizando una consulta con los principales proveedores de equipos para captura y análisis de movimiento en Colombia, se encontró que las siguientes instituciones educativas poseen estas tecnologías: Pontificia Universidad Javeriana, Universidad Manuela Beltrán, Universidad Central, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad Tecnológica de Pereira y Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. En Latinoamérica las instituciones con estas tecnologías son: Universidad Iberoamericana de Ciudad de México, Universidad Politécnica de Pachuca, Instituto INADE de Chile, Universidad Nacional de San Martín de Argentina, Universidad del Valle de Puebla, Tecnológico de Monterrey, Universidad Anáhuca de México y la Universidad Autónoma de Nuevo León de México. Los perfiles de mercado para la adquisición de estos equipos se basan principalmente en el entretenimiento (animación, broadcast, videojuegos, cine, entre otros), ingeniería (mecatrónica, bioingeniería, industrial, sistemas y aeronáutica) y ciencias de la salud (medicina del deporte, rehabilitación, biomecánica, biomédica), primando las compras para el desarrollo de investigaciones relacionadas con animación [57].

4. CONCLUSIONES

Los sistemas de captura de movimiento se deben elegir según su aplicación. En el caso de los estudios que requieran gran precisión e indagar sobre mecanismos de movimiento complejos, lo mejor es utilizar las tecnologías ópticas con marcadores como Vicon o BTS. El sistema Vicon lidera también las investigaciones en animación 3D, realidad virtual y realidad aumentada. Si son aplicaciones en biomecánica, telerehabilitación y rehabilitación de menor complejidad, se puede recurrir a la tecnología Kinect sin marcadores. Finalmente, para investigaciones que se requieran realizar al aire libre y sin restricciones de movimiento, la mejor opción son los sistemas inerciales y magnéticos.

En Colombia se han encontrado pocos estudios que involucren sistemas de captura del movimiento ópticos, esto debido al costo de las tecnologías. Dado que los sistemas inerciales son menos costosos y siguen reportando resultados precisos, son los más empleados en las investigaciones. Sin embargo, se deben realizar esfuerzos entre instituciones educativas y el sector empresarial para adquirir tecnologías (como los sistemas ópticos con marcadores) que permitan mejorar la competitividad nacional en ciencia, desarrollo tecnológico e innovación.

Los sistemas de captura del movimiento ópticos representan una gran oportunidad para el desarrollo de productos de entretenimiento digital, como videojuegos que involucren realidad virtual y permitan al jugador interactuar de manera más vívida con el espacio

del juego. El fortalecimiento de estas competencias en la comunidad educativa brindará las herramientas necesarias tanto a aprendices como instructores de los programas técnicos y tecnológicos de ilustración creativa, producción de contenidos animados para videojuegos, animación 3D y digital, producción audiovisual, doblaje, cine y televisión del SENA, para ser más competitivos y a su vez favorecer el crecimiento empresarial del país.

Los estudios biomecánicos con este tipo de tecnologías también permitirán ahondar más en investigaciones relacionadas con el diseño de componentes ergonómicos para calzado, útiles en los programas de formación técnicos y tecnológicos de diseño y producción de calzado y marroquinería del SENA. Dado que no se requieren estudios de gran especificidad y complejidad, los sistemas inerciales y ópticos sin marcadores son una excelente opción.

REFERENCIAS

- [1] M. Roberts, D. Mongeon, F. Prince, "Biomechanical parameters for gait analysis: a systematic review of healthy human gait", *Physical Therapy and Rehabilitation*, 4(6), 1-17, 2017.
- [2] M. Aurbach, K. Wagner, F. Süß, S. Dendorfer, "Implementation and Validation of Human Kinematics Measured Using IMUs for Musculoskeletal Simulations by the Evaluation of Joint Reaction Forces", *Singapore: CMBEBIH*, 62, 205-206, 2017.
- [3] P. Kopniak, "Motion capture using multiple Kinect controllers", *Przegląd. Elektrotechniczny*, 91(8), 26-29, 2015.
- [4] J. Wu, Z. Wang, S. Raghuraman, B. Prabhakaran, R. Jafari, Demonstration abstract: Upper body motion capture system using inertial sensors. IPSN-14 Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2014, pp. 351-352.
- [5] K. de Jesus, A. Abraldes, L. Mourão, M. Borgonovo-Santos, A. Medeiros, P. Gonçalves, P. Chainok, R. Fernandes, M. Vaz, J. Vilas-Boas, "The effect of different foot and hand set-up positions on backstroke start performance", *Sports Biomechanics*, 15(4), 481-496, 2016.
- [6] M. Yeung, S. Fu, E. Chua, K. Mok, P. Yung, K. Chan, "Use of a portable motion analysis system for knee dynamic stability assessment in anterior cruciate ligament deficiency during single-legged hop landing", *Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology*, 5, 6-12, 2016.
- [7] W. Kong, S. Sessa, S. Cosentino, M. Zecca, K. Saito, C. Wang, U. Imtiaz, Z. Lin, L. Bartolomeo, H. Ishii, T. Ikai, A. Takamishi, Development of a real-time IMU-based motion capture system for gait rehabilitation. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013, pp. 2100-2105.
- [8] B. Gabbasov, I. Danilov, I. Afanasyev, E. Magid, Toward a human-like biped robot gait: Biomechanical analysis of human locomotion recorded by Kinect-based Motion Capture system. 2015 - 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications. (ISMA), 2015, pp. 8-13.

- [9] G. Bleser, M. Miezal, C. Christmann, G. Bleser, B. Taetz, M. Miezal, C. Christmann, D. Steffen, Development of an Inertial Motion Capture System for Clinical Application. De Gruyter Oldenbourg. [Online]. 16(2), 113–129, 2017. [date of reference October 25th of 2017]. Available at: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/icom.2017.16.issue-2/icom-2017-0010/icom-2017-0010.pdf>
- [10] D. Ruddell, J. Kelly, M. Haverstock, Virtual-reality presentation volume within which human participants freely move while experiencing a virtual environment. Patent No. 15/000,695, 2016.
- [11] B. Pueo, J. Jimenez, Application of motion capture technology for sport performance analysis. Retos. [Online]. 32, 241–247, 2017. [date of reference October 28th of 2017]. Available at: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/64409/1/2017_Pueo_Jimenez-Olmedo_Retos.pdf
- [12] M. Alnowami, A. Khan, A. Morfeq, N. Allothmany, E. Hafez, Feasibility Study of Markerless Gait Tracking Using Kinect. Life Science Journal, [Online] 11(7), 514–523, 2014. [date of reference November 12th of 2017]. Available at: http://www.lifesciencesite.com/lj/life1107/068_B00059life110714_514_523.pdf
- [13] G. Mustapha, M. Abd, M. Mohd, N. Mohd, J. Mahmud, The development of a low cost motion analysis sistem: Cepak Visual 3D V1.0. International Journal GEOMATE, [Online] 11(24), pp. 2248–2252, 2016. [date of reference December 15th of 2017]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/296861999_The_development_of_a_low_cost_motion_analysis_system_Cepak_Visual_3D_v10
- [14] G. Urrútia, X. Bonfill, “Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis”, *Medicina Clínica (Barc)*, 135(11), 507–511, 2010.
- [15] D. Moher, L. Shamseer, M. Clarke, D. Gherzi, A. Liberati, M. Petticrew, P. Shekelle, L. Stewart, “Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement”, *Systematic Reviews*, 4(1), 1-9, 2015.
- [16] Y. Sagawa, K. Turcot, S. Armand, A. Thevenon, N. Vuillerme, E. Watelain, “Biomechanics and physiological parameters during gait in lower-limb amputees: A systematic review”, *Gait Posture*, 33(4), 511–526, 2011.
- [17] R. Dongo, M. Moscoso, R. Callupe, J. Pajaya, D. Elias, Normal human gait patterns in Peruvian individuals: an exploratory assessment using VICON motion capture system. 13th International Conference on Medical Information Processing and Analysis, 2017, p. 66.
- [18] Z. Ong, Y. Seet, S. Khoo, S. Noroozi, “Development of an economic wireless human motion analysis device for quantitative assessment of human body joint”, *Measurement*, 115, 306–315, 2018.
- [19] R. Matthew, S. Seko, R. Bajcsy, Fusing motion-capture and inertial measurements for improved joint state recovery: An application for sit-to-stand actions. 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2017, pp. 1893–1896.
- [20] Y. Lee, H. Yoo, “Low-cost 3D motion capture system using passive optical markers and monocular vision”, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 130, 1397–1407, 2017.
- [21] J. Linnell, Programming of a robotic arm using a motion capture system. Patent No. US 9056396 B1, 2015.
- [22] B. Le, M. Zhu, Z. Deng, “Marker Optimization for Facial Motion Acquisition and Deformation”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(11), 1859–1871, 2013.
- [23] M. Sandau, H. Koblauch, T. Moeslund, H. Aanaes, T. Alkjær, E. Simonsen, “Markerless motion capture can provide reliable 3D gait kinematics in the sagittal and frontal plane”, *Medical Engineering & Physics*, 36(9), 1168–1175, 2014.
- [24] R. Glover, N. Madsen, T. McLaughlin, Mapping between a capture volume and a virtual world in a motion capture simulation environment. Patent No. US 9159152 B1, 2015.
- [25] J. Stolzberg, R. Taylor, Immersive theatrical virtual reality system. Patent No. 15/243292, 2016.
- [26] R. Neeloy, H. Hongyuan, Augmented reality with motion sensing. Patent No. 14/821,499., 2015.
- [27] M. Ye, C. Yang, V. Stankovic, L. Stankovic, A. Kerr, “A Depth Camera Motion Analysis Framework for Tele-rehabilitation: Motion Capture and Person-Centric Kinematics Analysis”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(5), 877–887, 2016.
- [28] B. Mentiplay, L. Perraton, K. Bower, Y. Pua, R. McGaw, S. Heywood, R. Clark, “Gait assessment using the Microsoft Xbox One Kinect: Concurrent validity and inter-day reliability of spatiotemporal and kinematic variables”, *Journal of Biomechanics*, 48(10), 2166–2170, 2015.
- [29] M. Eltoukhy, J. Oh, C. Kuenze, J. Signorile, “Improved kinect-based spatiotemporal and kinematic treadmill gait assessment”, *Gait & Posture*, 51, 77–83, 2017.
- [30] P. Plantard, H. Shum, F. Multon, “Usability of corrected Kinect measurement for ergonomic evaluation in constrained environment”, *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 5(4), 338, 2017.
- [31] J. Cross, B. McHenry, R. Molthen, E. Exten, T. Schmidt, G. Harris, “Biplane fluoroscopy for hindfoot motion analysis during gait: A model-based evaluation”, *Medical Engineering & Physics*, 43, 118–123, 2017.
- [32] A. Fry, T. Herda, A. Sterczala, M. Cooper, M. Andre, “Validation of a motion capture System for deriving accurate ground reaction forces without a force plate”, *Big Data Analytics*, 1(11), 1–8, 2016.
- [33] D. Putrino, “Telerehabilitation and emerging virtual reality approaches to stroke rehabilitation”, *Current Opinion in Neurology*, 27(6), 631–636, 2014.
- [34] A. Smeragliuolo, N. Hill, L. Disla, D. Putrino, “Validation of the Leap Motion Controller using markedered motion capture technology”, *Journal of Biomechanics*, 49(9), 1742–1750, 2016.
- [35] W. Samson, S. Sanchez, P. Salvia, S. Jan, V. Feipel, “A portable system for foot biomechanical analysis during gait”, *Gait Posture*, 40(3), 420–428, 2014.
- [36] J. Sinclair, “Effects of barefoot and barefoot inspired footwear on knee and ankle loading during running”, *Clinical Biomechanics*, 29(4), 395–399, 2014.
- [37] J. Sinclair, C. Franks, J. Goodwin, R. Naemi, N. Chockalingam, Influence of footwear designed to boost energy return on the kinetics and kinematics of running compared to conventional run-

- ning shoes. *Comparative Exercise Physiology*, [Online]. 10(3), 199–206, 2014. [date of reference October 28th of 2017]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/264234398_Influence_of_footwear_designed_to_boost_energy_return_on_the_kinetics_and_kinematics_of_running_compared_to_conventional_running_shoes
- [38] J. Sinclair, S. Atkins, P. Taylor, H. Vincent, "Effects of conventional and minimalist footwear on patellofemoral and Achilles tendon kinetics during netball specific movements", *Comparative Exercise Physiology*, 11(3), 191–199, 2015.
- [39] J. Halstead, A. Keenan, G. Chapman, A. Redmond, "The feasibility of a modified shoe for multi-segment foot motion analysis: a preliminary study", *Journal Foot Ankle Res.*, 9(7), pp. 1–8, 2016.
- [40] C. Craig, "Understanding perception and action in sport: how can virtual reality technology help?", *Sport Technology*, 6(4), 161–169, 2013.
- [41] P. Jung, S. Oh, G. Lim, K. Kong, "A Mobile Motion Capture System Based on Inertial Sensors and Smart Shoes", *The Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 136(1), 11002, 2013.
- [42] A. Mangia, M. Cortesi, S. Fantozzi, A. Giovanardi, D. Borra, G. Gatta, "The Use of IMMUs in a Water Environment: Instrument Validation and Application of 3D Multi-Body Kinematic Analysis in Medicine and Sport", *Sensors*, 17(4), 927, 2017.
- [43] P. Raghavendra, M. Sachin, P. Srinivas, V. Talasila, H. Vishwakarma, S. Akashe, Eds., *Design and Development of a Real-Time, Low-Cost IMU Based Human Motion Capture System*. Singapore: Springer, 2017, pp. 155–165.
- [44] M. Aurbach, K. Wagner, F. Süß, S. Dendorfer, A. Badnjevic, Eds., "Implementation and Validation of Human Kinematics Measured Using IMUs for Musculoskeletal Simulations by the Evaluation of Joint Reaction Forces", *Singapore: CMBEBIH - Springer*, 62, 205–211, 2017.
- [45] A. Mangia, M. Cortesi, S. Fantozzi, A. Giovanardi, D. Borra, G. Gatta, "The Use of IMMUs in a Water Environment: Instrument Validation and Application of 3D Multi-Body Kinematic Analysis in Medicine and Sport", *Sensors*, 17(4), p. 927, 2017.
- [46] M. Jin, J. Zhao, J. Jin, G. Yu, W. Li, "The adaptive Kalman filter based on fuzzy logic for inertial motion capture system", *Measurement*, 49, 196–204, 2014.
- [47] I. Pasciuto, G. Ligorio, E. Bergamini, G. Vannozzi, A. Sabatini, A. Cappelletto, "How Angular Velocity Features and Different Gyroscope Noise Types Interact and Determine Orientation Estimation Accuracy", *Sensors*, 15(9), 23983–24001, 2015.
- [48] G. Bleser, B. Taetz, D. Steffen, K. Regenspurger, "Development of an Inertial Motion Capture System for Clinical Application", *Journal of Interactive Media*, 16(2), 113–129, 2017.
- [49] B. Müller, W. Ilg, M. Giese, N. Ludolph, "Validation of enhanced kinect sensor based motion capturing for gait assessment", *PLoS One*, 12(4), e0175813, 2017.
- [50] S. Bolink, H. Naisas, R. Senden, H. Essers, I. Heyligers, K. Meijer, B. Grimm, "Validity of an inertial measurement unit to assess pelvic orientation angles during gait, sit–stand transfers and step-up transfers: Comparison with an optoelectronic motion capture system", *Medical Engineering & Physics*, 38(3), 225–231, 2016.
- [51] Y. Liu, S. Gong, Y. Lu, Estimation of inertial/magnetic sensor orientation for human-motion-capture system. 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), 2017, pp. 175–179.
- [52] V. Agostini, L. Gastaldi, V. Rosso, M. Knaflitz, S. Tadano, "A Wearable Magneto-Inertial System for Gait Analysis (H-Gait): Validation on Normal Weight and Overweight/Obese Young Healthy Adults", *Sensors*, 17(10), 2406, 2017.
- [53] B. McHenry, E. Exten, J. Long, G. Harris, "Sagittal Fluoroscopy for the Assessment of Hindfoot Kinematics", *Journal of Biomechanical Engineering*, 138(3), 34502, 2016.
- [54] J. Cross, B. McHenry, R. Molthen, E. Exten, T. Schmidt, G. Harris, "Biplane fluoroscopy for hindfoot motion analysis during gait: A model-based evaluation", *Medical Engineering & Physics*, 43, 118–123, 2017.
- [55] R. Jia, S. Mellon, P. Monk, D. Murray, J. Noble, "A computer-aided tracking and motion analysis with ultrasound (CAT & MAUS) system for the description of hip joint kinematics", *The International Journal for Computer Assisted Radiology and Surgery*, 11(11), 1965–1977, 2016.
- [56] J. Marin, T. Blanco, J. Marin, "Octopus: A Design Methodology for Motion Capture Wearables", *Sensors*, 17(8), 1875, 2017.
- [57] Hcg.Tech, "Hcg.Tech." HCGTechnologies, pp. 1–19, 2017.