

Explorando la dinámica de la marcha humana: Una revisión de sistemas de análisis basados en dispositivos de captura de imágenes¹

Exploring human gait dynamics: A review of image capture device-based analysis systems

D. A. Fernández, C. F. Rengifo y P. E. Caicedo

Recibido: octubre 05 de 2023 – Aceptado: junio 30 de 2024.

Resumen—La marcha humana ha sido estudiada utilizando diversas tecnologías que miden variables espacio-temporales, como la duración de las fases de apoyo, la velocidad y cadencia, la longitud y el ancho del paso, entre otros. En esta revisión se han explorado sistemas estáticos y móviles integrados con dispositivos de captura de imágenes como cámaras RGB-D. Estos sistemas han sido probados en varios grupos de participantes, incluyendo personas con enfermedades como el Parkinson y lesiones cerebrovasculares, así como individuos sanos. Los resultados muestran que muchas de estas tecnologías tienen una correlación significativa con los sistemas "Gold Standard" como el sistema Vicon, aunque se evidencian limitaciones y desafíos, como la precisión y la aplicabilidad en diferentes entornos. Sin embargo, estos avances tienen un impacto potencialmente significativo en la evaluación y tratamiento de los trastornos de la marcha.

Palabras clave—Análisis de marcha humana, cámaras RGB-D, robots, sistemas móviles, sistemas estáticos, variables espacio-temporales.

Abstract—Human gait has been studied using various technologies that measure spatiotemporal variables, such as the duration of support phases, speed and cadence, step length, and width, among others. In this review, static and mobile systems

integrated with image capture devices such as RGB-D cameras have been explored. These systems have been tested on various groups of participants, including people with Parkinson's and cerebrovascular injuries, as well as healthy individuals. The results show that many of these technologies have significant correlation with "Gold Standard" systems such as Vicon, although limitations and challenges are evident, such as accuracy and applicability in different settings. Nevertheless, these advances have a potentially significant impact on the assessment and treatment of gait disorders.

Keywords—Human gait analysis, RGB-D cameras, robots, mobile systems, static systems, spatio-temporal variables.

I. INTRODUCCIÓN

EL análisis de la marcha humana es una disciplina que se remonta a la época de Aristóteles (384 – 322 a. C.), quien utilizando un método rudimentario que involucraba una caña impregnada en tinta sujeta a la cabeza de un individuo en movimiento junto a una pared, observó que el patrón dibujado en la pared era ondulatorio. Este hallazgo desafió la creencia predominante de la época sobre un movimiento rectilíneo. Desde entonces, el campo ha evolucionado significativamente, impulsado por avances científicos y matemáticos que se originaron en el Renacimiento, sentando las bases para lo que ahora se conoce como análisis moderno de la marcha humana [1].

En los últimos años, este análisis ha adquirido gran importancia, especialmente en el contexto de la salud, y ha sido objeto de investigaciones que abarcan desde la medicina deportiva hasta la rehabilitación [2]–[4]. Tradicionalmente, las plataformas de fuerza y sistemas de captura de movimiento con marcadores han sido los métodos predominantes para estudiar la marcha. Sin embargo, estos sistemas presentan ciertas limitaciones, incluidos costos elevados, necesidad de entornos controlados y cierto grado de invasividad [5], [6]. Es en este escenario donde los sistemas de análisis de marcha basados en cámaras, especialmente aquellos que emplean tecnologías RGB-D, surgen como alternativas prometedoras.

El presente artículo abordará en detalle la importancia del análisis de marcha humana, explorando las variables clave que

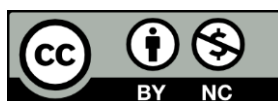
¹Producto derivado del proyecto de investigación "Sistema de medición de longitud y ancho de paso en marcha humana durante distancias prolongadas", apoyado por la Universidad del Cauca y el proyecto Jóvenes Investigadores e Innovadores del departamento del Cauca 2023.

D. A. Fernández, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: dfsabogal@unicauca.edu.co

C. F. Rengifo, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: caferen@unicauca.edu.co

P. E. Caicedo, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, email: pablo.caicedo@escuelaing.edu.co

Como citar este artículo: Fernández, D. A., Rengifo, C. F., y Caicedo, P.E. Explorando la dinámica de la marcha humana: Una revisión de sistemas de análisis basados en dispositivos de captura de imágenes, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 18, no. 35, pp. 67-74, enero-junio 2024. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.2982>.



se evalúan y las tecnologías utilizadas para su captura. Se examinarán diversas alternativas y enfoques basados en este tipo de cámaras, considerando las validaciones realizadas con sistemas tradicionales y las propuestas más recientes que buscan superar las limitaciones actuales en la medición de variables espacio-temporales de marcha humana.

Esta revisión se centrará en estudios publicados entre los años 2010 y 2023, abarcando tecnologías de captura de imágenes, principalmente cámaras RGB-D. Se excluirán otros métodos de análisis de marcha, como los basados en sensores inerciales o plataformas de fuerza etc. a menos que se comparen directamente con sistemas basados en cámaras. Se llevará a cabo una búsqueda sistemática en la base de datos académica Scopus, utilizando palabras clave como “análisis de marcha humana”, “cámaras 3D”, “RGB-D”, “Mocap”, entre otras.

II. IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE LA MARCHA HUMANA EN LA SALUD: VARIABLES ANALIZADAS, CONSIDERACIONES Y TECNOLOGÍAS DE CAPTURA

El análisis de la marcha humana desempeña un papel crucial en la detección de problemas de salud vinculados a enfermedades neurológicas [7], [8], como el Parkinson [9], [10], la parálisis cerebral [11] y la esclerosis múltiple [12], entre otras; las cuales han demostrado influir en los patrones de marcha de las personas. También, se ha utilizado como herramienta para cuantificar el riesgo de caídas en adultos mayores, así como para optimizar el rendimiento deportivo [3], [13]–[16],

Dentro de las múltiples variables analizadas en estudios de marcha humana, se encuentran: la velocidad de la marcha, la cadencia, la duración de las fases de apoyo y despegue, las fuerzas de reacción entre el pie y el suelo, la longitud y el ancho de paso; estos últimos haciendo referencia a la distancia entre los puntos de contacto de pies alternos con el suelo y la separación entre ambos pies, respectivamente [17]. Estas variables son objeto importante de estudio para identificar anomalías en la marcha. Por ejemplo, en un estudio con 230 participantes mayores de 75 años [18], se evaluó si los cambios en el patrón de marcha al realizar tareas simultáneas estaban relacionados con el riesgo de caídas. Los resultados revelaron que el aumento o disminución del ancho de paso al caminar y realizar una tarea adicional, constituía un indicador de riesgo de caída. Asimismo, otro estudio [19], señaló que la pérdida de estabilidad en el plano medio-lateral durante la marcha sobre una superficie específica, afecta el riesgo de caída en este tipo de población.

Para garantizar la validez estadística de los análisis anteriormente descritos es crucial contar con un número significativo de pasos en las caminatas estudiadas. Investigaciones anteriores han establecido distintos umbrales para garantizar la validez estadística de las mediciones. Por ejemplo, un estudio ha determinado que se necesitan al menos 125 zancadas para obtener un coeficiente de variación en las aceleraciones del tronco menor al 10% [20]. Otros han establecido que se requieren un mínimo de 600 zancadas para diferenciar de manera fiable entre la marcha normal y

patológica, utilizando técnicas avanzadas de análisis de series temporales [21]. Estas consideraciones demuestran la importancia de capturar un volumen adecuado de datos para lograr resultados precisos y fiables en el análisis de marcha humana.

Si bien, las bandas caminadoras permiten la captura de movimiento de cientos de pasos, su uso plantea ciertas limitaciones en el estudio de la marcha humana. Estas máquinas afectan el patrón natural de la marcha [22] debido a variaciones sutiles en su velocidad, lo cual altera las interacciones de fuerza entre el usuario y la banda [23]. Investigaciones previas han mostrado que la marcha en estas condiciones produce diferencias notables en las fuerzas de reacción del pie contra el suelo, así como pequeñas variaciones en los ángulos articulares [24]. Por ejemplo, estudios indican que las fuerzas de reacción son significativamente menores y la longitud de los pasos se reduce cuando se utiliza una banda caminadora en comparación con la marcha en una superficie regular [25]. Además, en los 22 estudios presentados en [26], se encontraron diferencias significativas entre las variables obtenidas para la marcha sobre el suelo y para la marcha sobre una banda caminadora. Estas diferencias resaltan la importancia de seleccionar cuidadosamente el entorno para estudiar la marcha humana de forma precisa y confiable.

En este contexto, un sistema de captura de movimiento para estudios de marcha humana debe garantizar: precisión y exactitud para respaldar la confiabilidad del análisis de marcha [27]; una alta tasa de muestreo para detectar variaciones de la marcha [28]; y suficiente autonomía para permitir la captura de movimiento en caminatas prolongadas, las cuales se requieren para garantizar la confiabilidad estadística del análisis de marcha [29]. Finalmente, el sistema de medición no debe restringir la movilidad del participante, permitiendo así una evaluación correcta de la marcha en condiciones naturales [30].

En la actualidad, el Gold Standard en sistemas de captura de movimiento se compone de un conjunto de cámaras optoelectrónicas que incluyen diodos emisores de luz infrarroja (LED) y marcadores reflectivos. En funcionamiento, los LED generan un efecto estroboscópico hacia el área de captura para que los marcadores reflectivos colocados en el sujeto permitan que las cámaras detecten y sigan los movimientos en el espacio tridimensional. Este sistema posibilita la obtención de información detallada sobre el movimiento humano, proporcionando una amplia gama de datos para un análisis exhaustivo. Sin embargo, el recorrido de marcha se limita a unos pocos metros [5]. En segundo lugar, se pueden encontrar otros tipos de sistemas basados IMU (Inertial Measurement Units) [31], compuestas por giroscopios, magnetómetros y acelerómetros, estos se colocan en el cuerpo del individuo durante la marcha. Aunque pueden utilizarse en exteriores para obtener gran cantidad de datos, son muy sensibles a interferencias magnéticas [32] y requieren procedimientos complejos para determinar su orientación respecto a los ejes anatómicos del participante [33], además, presentan limitaciones en la precisión al medir variables espaciales de la marcha, como, por ejemplo, longitud y especialmente el ancho de paso [32]. El tercer principio de

medición se basa en plataformas fijas al suelo, las cuales miden las fuerzas de reacción entre el pie y el suelo en los ejes vertical, anteroposterior, y mediolateral [6]. Estas al igual que las cámaras infrarrojas reducen la caminata a unos pocos pasos. El cuarto tipo de sistemas de medición lo constituyen las plantillas para calzado dotadas de sensores de presión [34], las cuales, aunque capturan información en caminatas prolongadas, no permiten estimar variables espaciales de marcha.

Además de los sistemas comerciales previamente mencionados, investigaciones recientes han propuesto alternativas que se basan en cámaras Time of Flight (ToF) [35]. Una extensión de estas, conocida como *Light Detection and Ranging* (LIDAR) [36], también ha sido considerada como una opción. Sin embargo, estos sistemas muestran diversas limitaciones en cuanto a la duración de la marcha y el entorno de uso, al igual que los sistemas propuestos que emplean cámaras RGB, como se describe en [37], y [38]. Por último, el sistema descrito en [39], basado en Laser Range Finder (LRF) se restringe a uso interior debido a que utiliza una banda caminadora y requiere de marcadores reflectivos.

III. SISTEMAS DE MEDICIÓN DE VARIABLES ESPACIO-TEMPORALES DE MARCHA HUMANA

En la investigación de la marcha humana, contar con sistemas precisos y confiables para medir variables espacio-temporales es esencial, ya que estos sistemas proporcionan datos detallados que permiten entender la bipedestación de los humanos. Dentro de este marco, se han desarrollado diversas tecnologías y enfoques basados en cámaras para abordar las limitaciones de los sistemas actuales y llevar a cabo mediciones buscando precisión y confiabilidad en la información. En este contexto, a continuación, se presentan diferentes tecnologías diseñadas para el análisis de marcha humana basadas en cámaras RGB-D.

A. Sistemas estáticos

Los sistemas de análisis de marcha se clasifican, entre otros criterios, en función de su movilidad y espacio de operación. En este espectro, los sistemas estáticos de marcha desempeñan un papel esencial y están diseñados para operar en un espacio fijo, sin desplazarse junto al sujeto. Su funcionamiento se basa en capturar y analizar la dinámica del movimiento humano mientras este se desplaza dentro de un área previamente definida. Los sistemas basados en Microsoft Kinect son populares en esta área, por ejemplo, los estudios presentados en 2013 [40], [41] emplean este dispositivo y destacan su correlación con ciertas variables espaciales de marcha al ser contrastadas con sistemas ópticos comerciales. Según los autores, gracias a su bajo costo y disponibilidad, estos dispositivos podrían ofrecer a los profesionales de la salud herramientas valiosas para evaluar ciertos parámetros espacio-temporales de la marcha. No obstante, plantean que es esencial ser selectivo con las variables de interés, ya que no todas pueden ser medidas con la precisión deseada utilizando Microsoft Kinect. Adicionalmente, es pertinente mencionar que, en 2013, el software desarrollado para este propósito con

el Kinect aún estaba en una etapa inicial, lo que demandaba investigaciones y desarrollos adicionales para maximizar su precisión y aplicabilidad en el análisis de marcha humana.

Con el avance tecnológico en software y hardware de los últimos años, los sistemas basados en este tipo de cámaras han venido ganando importancia y se han implementado como apoyo para el análisis de diferentes tipos de enfermedades, como es el caso del sistema presentado en [42], en el cual se lleva a cabo una prueba piloto con el propósito de investigar si una cámara de profundidad, como la Microsoft Kinect v2, puede identificar cambios en las características de la marcha en pacientes con Parkinson, tanto antes como después de la administración de medicación. Los resultados revelaron diferencias significativas en la longitud de paso y la velocidad promedio entre los pacientes diagnosticados con la enfermedad y los controles sanos, sugiriendo que la cámara empleada podía constituir una herramienta eficaz para cuantificar el comportamiento de la marcha, específico de la enfermedad de Parkinson. No obstante, también se evidenció que no hubo diferencias estadísticamente significativas en las características de las pruebas entre las condiciones de participantes medicados y no medicados, aunque sí se detectaron diferencias de manera clínica.

En esta misma línea, el estudio presentado en [43], emplea una tecnología estática para evaluar variables espacio-temporales de marcha en dos grupos: 10 individuos con Parkinson (PD) y 11 con lesiones post-accidente cerebrovascular (PS). Este utiliza el sensor Microsoft Kinect v2 y se contrasta con un sistema Vicon de 6 cámaras y dos plataformas de fuerza Kistler, que sirven como referencia estándar. Los resultados indican una correlación significativa entre ambos sistemas en parámetros clave de la marcha, como longitud de paso, fases de apoyo y velocidad promedio, entre otros.

En otras aplicaciones, en [44], se compara el Kinect v2 con un sistema de referencia (Qualisys de 12 cámaras) para analizar parámetros de marcha en pacientes con polineuropatía amiloide familiar por transtiretina (TTR-FAP). Usando datos tridimensionales de diez pacientes durante diez pruebas de marcha, se calcularon parámetros espacio-temporales y cinemáticos. Los resultados indican que el sistema RGB-D es preciso en la mayoría de los parámetros evaluados. Su aplicación puede ofrecer un análisis más objetivo en pacientes con polineuropatía, beneficiando potencialmente su tratamiento y comprensión de TTR-FAP.

En [45], se lleva a cabo una comparación entre una cámara Microsoft Kinect v2 y un sistema Vicon compuesto por 12 cámaras. El objetivo principal es detectar variaciones relevantes en los patrones de marcha de pacientes diagnosticados con amiloidosis ATTRv. La investigación se estructuró en dos fases, realizando pruebas iniciales (T0) y repitiéndolas 18 meses después (T1) con un total de seis pacientes. Los datos recopilados indican que las discrepancias observadas entre T0 y T1 para ambas tecnologías, presentan tendencias similares en el 65% de los parámetros espacio-temporales evaluados. Asimismo, se observó una concordancia en el 38% de los parámetros cinemáticos analizados, dando como resultado que este tipo de tecnologías puede contribuir significativamente a la evaluación de este

tipo de enfermedades.

Es evidente que la cámara RGB-D Microsoft Kinect ha sido ampliamente utilizada en el análisis del movimiento humano, tanto en personas sin condiciones asociadas a la marcha [40], [46]–[49], como en aquellas con diversas discapacidades [50]–[54]. Aunque existen otras cámaras como la Intel Realsense y la Orbbec Astra Pro v2, su participación en estudios relacionados ha sido menor. Una posible razón para esta preferencia podría ser el costo relativamente más elevado de estos dispositivos en comparación con el Microsoft Kinect.

En el estudio realizado en [55], se emplea una cámara Intel Realsense con el objetivo de desarrollar un "juego serio" destinado a la rehabilitación de la parte superior del cuerpo. Este juego se basa en reconocer y responder a gestos específicos realizados con las manos de los usuarios. En [56], se utiliza una Realsense y un sistema Okulus Rift DK2, para desarrollar un juego terapéutico en el que el paciente debe ejecutar una secuencia específica de movimientos de abducción y aducción del brazo, con el objetivo de rehabilitar el manguito rotador tras sufrir una lesión. En [57] al igual que en [56], se utiliza el mismo principio para desarrollar un juego serio utilizando realidad aumentada para evaluar las disfunciones motoras de las extremidades superiores.

En los estudios presentados en [58], [59], se emplea la tecnología Realsense, que resulta especialmente útil en el ámbito médico y terapéutico gracias a su diseño específico para registrar movimientos faciales con precisión, donde se emplea para el diagnóstico, tratamiento y evaluación de diversos trastornos del habla. Además, estas aplicaciones se extienden al ámbito del reconocimiento emocional, permitiendo identificar gestos asociados con emociones específicas, como la felicidad y la tristeza. Esta capacidad de discernir expresiones faciales tiene potencial en múltiples campos, desde la terapia psicológica hasta la interacción hombre-máquina.

Para el caso de la Orbbec Astra Pro v2, el estudio presentado en [60] determina que el dispositivo presenta un rendimiento de seguimiento inferior en comparación con Azure Kinect y Kinect v2. El estudio menciona que Azure Kinect tiene un buen rendimiento de seguimiento de los ángulos sagitales de la articulación de la cadera y la rodilla durante las pruebas de caminata en cinta rodante en ángulos de visión de la cámara no frontal, mientras que el Orbbec Astra Pro v2 tiene una menor precisión en el seguimiento de los patrones cinemáticos de la marcha.

Finalmente, en el campo del análisis de la marcha humana, se ha visto cómo diversos sistemas estáticos han sido empleados con el fin de aportar a la comprensión y rehabilitación de condiciones asociadas al movimiento. La cámara RGB-D Microsoft Kinect se ha establecido como la herramienta líder en esta área, valorada por su eficiencia costo-beneficio y su capacidad de análisis en diversos escenarios. Sin embargo, mientras que Kinect ha dominado el campo del análisis de la marcha, otras tecnologías como Intel Realsense y Orbbec Astra Pro v2 han encontrado nichos específicos, desde la rehabilitación a través de juegos serios

hasta el reconocimiento emocional mediante la detección de gestos faciales. A pesar de las ventajas individuales que cada tecnología aporta, es esencial reconocer la complementariedad de estas herramientas en la creación de un panorama integral para la evaluación y tratamiento en el ámbito médico y terapéutico, mientras que algunas tecnologías pueden sobresalir en áreas específicas, la colaboración y la integración de diversas herramientas permitirán avances más significativos en la comprensión y mejora del movimiento humano.

B. Sistemas móviles

En contraste con los sistemas estáticos, los sistemas móviles de análisis de marcha ofrecen una dinámica diferente en la captura y evaluación del movimiento humano. Estos sistemas están diseñados para desplazarse junto al sujeto, permitiendo la monitorización de la marcha en entornos más naturales y amplios. A menudo, se integran con tecnologías como robots autónomos, plataformas móviles, sensores y cámaras que pueden seguir al individuo, adaptándose a diferentes ritmos y patrones de movimiento. Su principal ventaja es la flexibilidad y adaptabilidad, permitiendo la captura de datos en situaciones más próximas a la vida cotidiana y en recorridos más largos. En este contexto, en [27] se presenta una plataforma móvil diseñada para analizar la marcha patológica. Esta plataforma combina un sensor Kinect con un robot móvil (Pioneer 3DX), ofreciendo la capacidad de seguir al individuo y recopilar datos sobre su marcha en tiempo real. A diferencia de sistemas estáticos, esta herramienta permite al sujeto moverse libremente sin restricciones espaciales. Al comparar los resultados con un sistema Vicon equipado con ocho cámaras, el error en la longitud de zancada fue del 2%. Además, al evaluar los ángulos de las extremidades inferiores de dos voluntarios en una cinta rodante, se encontraron coeficientes de correlación entre 0.65 y 0.88 para los ángulos de cadera y rodilla entre ambos sistemas.

En la misma línea de robots seguidores de personas, en [61] se muestran un sistema de medición de variables articulares basado en el robot móvil Rosbot 2.0 y una cámara 3D (Orbbec Astra). Para validar el prototipo se compararon las medidas obtenidas en 10 hombres y 10 mujeres con respecto a un sistema Vicon de seis cámaras (M2 MCAM) con 32 marcadores reflectivos. Para ambos grupos se encontró una alta correlación entre los dos sistemas de medición. Los coeficientes de correlación para los ángulos de cadera y rodilla variaron entre 0.78 y 0.98, lo que presenta una superioridad significativa con respecto al sistema descrito en [27].

En [62], se propone un sistema que combina un robot móvil Kobuki con una cámara Microsoft Kinect v1 y un computador para procesar la información. Diseñado para seguir a individuos manteniendo una distancia de 1.3 metros, la cámara se posiciona a 25° en relación con el suelo, garantizando una visión completa del sujeto. Al comparar con un sistema Vicon en pruebas realizadas en un joven de 20 años, y tras aplicar un filtro de Kalman, se observaron errores en varias métricas de marcha, como la longitud de zancada y

la cadencia. Sin embargo, el estudio tiene limitaciones, como la precisión del sistema, la validación basada en un solo participante y el entorno de prueba. Los autores subrayan la necesidad de más investigaciones para confirmar la eficacia de esta metodología.

Un sistema que integra diferentes tecnologías es presentado en [63], esta combina un robot autónomo (P3-DX), una cámara RGB-D Kinect v2 y calzado instrumentado equipado con sensores piezoresistivos, una unidad de registro de datos y una IMU. Al validarlo contra un sistema Vicon con ocho cámaras, se encontró que la combinación de estos dispositivos ofrecía resultados significativamente más precisos que cuando se usaban de manera individual. Los errores registrados en diversas métricas de marcha, como la longitud de zancada y la velocidad de zancada, fueron mínimos, respaldando la idea de que la integración de robots, cámaras RGB-D y calzados sensorizados mejora la precisión en la evaluación de la marcha humana.

ROBOgait es una innovadora herramienta móvil diseñada para el análisis de la marcha humana en espacios abiertos [64]. Esta solución integra un robot móvil (robot), una computadora compacta (Intel NUC), un sensor LIDAR, un servomotor y una cámara RGB-D (Orbbec Astra). A diferencia de otros sistemas mencionados en [27], [61], [62], ROBOgait analiza la marcha desde el frente del paciente, capturando datos de los planos sagital, frontal y transversal. Este sistema no solo está programado para rutas específicas, sino que también puede esquivar obstáculos y, gracias a un servomotor vinculado a la cámara, mantiene un seguimiento constante del sujeto. Durante las pruebas de validación con 37 participantes sanos, se contrastó su precisión con un sistema Vicon con seis cámaras. Los resultados mostraron correlaciones robustas superiores a 0.7 en parámetros como el movimiento del codo, rodilla, cadera y hombro en el plano sagital. Sin embargo, para mediciones como la inclinación del tronco y la pelvis, la correlación fue moderadamente inferior, situándose en 0.55.

En [65] se presenta un sistema que combina un robot móvil, una cámara Kinect v2 y un telémetro láser para monitorear y analizar la marcha de un usuario desde la parte frontal del mismo. Esta configuración detalla tanto los componentes físicos como los algoritmos de software que permiten una evaluación precisa de la marcha. Al ser probado en individuos sanos, el sistema demostró ser preciso y fácil de usar. Dada su eficacia, se sugiere que esta tecnología podría ser implementada en entornos clínicos y de rehabilitación para evaluar y mejorar la marcha de los pacientes.

Otra alternativa se muestra en [66], un sistema móvil que, mediante el uso de una única cámara RGB-D, puede rastrear y analizar la marcha humana en un sistema de coordenadas canónicas. Este avanzado sistema combina información de imágenes de profundidad con articulaciones 2D derivadas de imágenes RGB para ofrecer una estimación 3D precisa de la postura de las extremidades inferiores, que es invariable a las variaciones de la cámara. A través de esta fusión de datos, es capaz de rastrear en tiempo real tanto la posición y orientación 6D de la cámara como el esqueleto 3D de las extremidades

inferiores. Además, el estudio detalla cómo se seleccionan y reconocen características específicas de la marcha, enfocándose especialmente en la identificación de marchas anómalas. Los resultados experimentales destacan la eficacia del sistema, mostrando no solo una acertada estimación postural de las extremidades inferiores, sino también una precisión en el reconocimiento de marchas superior a la de métodos previamente establecidos.

En los trabajos encontrados en [67]–[69], se introducen diversas plataformas móviles equipadas con cámaras RGB-D dedicadas al estudio y análisis de la marcha humana, específicamente diseñadas para aplicaciones en entornos clínicos y de rehabilitación. Estas investigaciones resaltan la versatilidad y eficacia de estas plataformas en la captura y evaluación de variables relacionadas con la marcha. Asimismo, las conclusiones de estos estudios refuerzan la idea de que dichos sistemas no solo son prometedores, sino también esenciales, en la evolución de las herramientas de diagnóstico y tratamiento en el ámbito médico.

El avance tecnológico en el análisis de marcha ha evolucionado considerablemente, transitando de sistemas estáticos a soluciones móviles más flexibles y adaptativas. Las plataformas móviles, al integrar componentes como robots autónomos, sensores y cámaras RGB-D, ofrecen una ventaja superior en la capacidad de monitorizar la marcha en entornos más amplios y naturales. Esta ventaja se traduce en evaluaciones más realistas, en contextos que simulan la vida diaria de los individuos. Como se destacó en varios estudios, en los párrafos precedentes, estos sistemas muestran resultados precisos y correlaciones robustas con sistemas comerciales de referencia como Vicon. Sin embargo, no son exentos de desafíos y áreas de mejora, la precisión varía según el diseño y los componentes del sistema, y algunos todavía enfrentan limitaciones en términos de validación y aplicabilidad. No obstante, el potencial de esta tendencia es hacia la adopción de herramientas más dinámicas y versátiles que se acercan más al comportamiento humano natural.

A continuación, se presenta en la tabla I resumen en donde se relacionan los sistemas estáticos y móviles desarrollados para el análisis de marcha humana.

IV. CONCLUSIONES

Los sistemas estáticos desempeñan un papel crucial en el análisis de la marcha humana, en ese sentido, la cámara RGB-D Kinect se presenta como una herramienta líder en este campo, su relevancia se ve reforzada por los avances tecnológicos recientes, convirtiéndola en una opción especialmente viable para el estudio de la marcha asociada a diversas enfermedades.

Los sistemas móviles, al integrar cámaras RGB-D con robots, representan una innovación destacada en el análisis de la marcha humana. Su capacidad para ofrecer flexibilidad y adaptabilidad se evidencia en su eficiencia, al permitir que el sujeto se desplace libremente sin las limitaciones inherentes a los sistemas estáticos. Estas características hacen de los sistemas móviles una herramienta valiosa en entornos de clínicos y de investigación.

TABLA I
SISTEMAS PROPUESTOS PARA EL ANÁLISIS DE LA MARCHA HUMANA

Tipo de sistema	Tecnología	Variables analizadas	Tipo de uso sugerido	Referencia
Estático	M. Kinect	Espacio-temporales	Entornos clínicos	[27]
		Continuidad en la marcha	Hogar de adultos mayores	[38]
		Espacio-temporales	Entornos clínicos	[40]
		Espacio-temporales. Otras	Amiloidosis ATTRv	[45]
		Equilibrio	Estabilidad postural	[46]
		Espacio-temporales. Otras	Esclerosis múltiple	[50]
		Espacio-temporales. Otras	Esclerosis múltiple	[52]
		Espacio-temporales. Otras	Parkinson	[53]
		Equilibrio Postura	Equilibrio de pie y control postural	[54]
		-	Rehabilitación	[56]
Estático tipo juego		Espacio-temporales	Enfermedad de Parkinson	[70]
Estático	M. Kinect v2	Espacio-temporales	Enfermedad de Parkinson	[42]
		Espacio-temporales. Características relacionadas con la inestabilidad dinámica.	Accidente cerebrovascular y Parkinson	[43]
		Espacio-temporales. Otras	Polineuropatía	[44]
		Espacio-temporales	Entornos clínicos	[47]
		Espacio-temporales. Otras	Entornos clínicos	[48]
Estático	Azure Kinect	Dataset 315 secuencias de caminata	investigación, desarrollo y validación de algoritmos para el seguimiento del cuerpo humano y el análisis de la marcha.	[49]
		Espacio-temporales. Otras	Hemodiálisis crónica	[51]
Móvil	Orbbec Astra	Espacio-temporales. Otras	Entornos clínicos	[61]
				[64]
				[65]
	M. Kinect	Espacio-temporales. Otras	Entornos clínicos	[62]
				[69]
	M. Kinect v2	Espacio-temporales	Entornos clínicos	[63]
Cámara RGBD	Espacio-temporales. Otras	Entornos clínicos	[66]	
Realsense	Espacio-temporales	Entornos clínicos	[68]	

En términos de precisión y validación, varios sistemas móviles, cuando se comparan con sistemas de referencia como el *Gold Standard* (Vicon), han mostrado correlaciones y precisiones significativas, indicando su potencial en aplicaciones clínicas y de rehabilitación. Sin embargo, algunos sistemas aún requieren más pruebas y validaciones, especialmente en diferentes entornos y con diferentes grupos de individuos.

La fusión de diversas tecnologías, como robots, cámaras RGB-D y calzados instrumentados, han abierto un panorama prometedor en el estudio de la marcha humana. Esta integración no solo refuerza la precisión de las evaluaciones, sino que también destaca la potencialidad de combinar múltiples herramientas y dispositivos para lograr análisis más precisos y detallados. La evolución en este campo sugiere una orientación hacia la interconexión tecnológica para optimizar el entendimiento y tratamiento de las dinámicas de marcha.

En términos de eficiencia de los sistemas, algunos de estos tienen limitaciones en cuanto a precisión, validación y entorno de prueba. Esto sugiere la necesidad de mejoras continuas, así como la realización de estudios adicionales para maximizar su eficacia.

V. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores, D. A. Fernández, C. F. Rengifo de la Universidad del Cauca, y P. E. Caicedo de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, expresan su profundo agradecimiento al proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca 2023, así, como a la Universidad del Cauca y la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. La contribución logística y financiera de este proyecto ha sido instrumental en la realización de esta investigación, permitiendo superar desafíos y lograr los objetivos propuestos. Los autores valoran especialmente el impulso que tales programas ofrecen para el avance de la ciencia y la formación de futuros líderes en investigación en la región.

REFERENCIAS

- [1] M. Nirenberg, W. Vernon, y I. Birch, "A review of the historical use and criticisms of gait analysis evidence", *Science and Justice*, vol. 58, núm. 4, pp. 292–298, 2018, doi: 10.1016/j.scijus.2018.03.002.
- [2] J. M. Hausdorff, "Gait variability: methods, modeling and meaning", 2005, doi: 10.1186/1743.
- [3] E. van der Kruk y M. M. Reijne, "Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review", *Eur J Sport Sci*, vol. 18, núm. 6, pp. 806–819, jul. 2018, doi: 10.1080/17461391.2018.1463397.
- [4] S. R. Simon, "Quantification of human motion: gait analysis—benefits and limitations to its application to clinical problems", *J Biomech*, vol. 37, núm. 12, pp. 1869–1880, dic. 2004, doi: 10.1016/J.JBIOMECH.2004.02.047.
- [5] M. Topley y J. G. Richards, "A comparison of currently available optoelectronic motion capture systems", *J Biomech*, vol. 106, p. 109820, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109820.
- [6] E. Yiou, C. Teyssèdre, R. Artico, y P. Fourcade, "Comparison of base of support size during gait initiation using force-plate and motion-capture system: A Bland and Altman analysis", *J Biomech*, vol. 49, núm. 16, pp. 4168–4172, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.11.008.
- [7] Y. Tang et al., "Association between gait features assessed by artificial intelligent system and cognitive function decline in patients with silent cerebrovascular disease: study protocol of a multicenter prospective

- cohort study (ACCURATE-2)", *BMC Neurol*, vol. 22, núm. 1, p. 240, 2022, doi: <https://doi.org/10.1186/s12883-022-02767-2>.
- [8] M. D. Gor-García-Fogeda, R. Cano de la Cuerda, M. Carratalá Tejada, I. M. Alguacil-Diego, y F. Molina-Rueda, "Observational Gait Assessments in People With Neurological Disorders: A Systematic Review", *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 97, núm. 1, pp. 131–140, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2015.07.018>.
- [9] M. I. A. S. N. Ferreira, F. A. Barbieri, V. C. Moreno, T. Penedo, y J. M. R. S. Tavares, "Machine learning models for Parkinson's disease detection and stage classification based on spatial-temporal gait parameters", *Gait Posture*, vol. 98, pp. 49–55, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.08.014>.
- [10] L. Cupertino et al., "Biomechanical aspects that precede freezing episode during gait in individuals with Parkinson's disease: A systematic review", *Gait Posture*, vol. 91, pp. 149–154, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.10.021>.
- [11] B. Bagrowski, J. Kraśny, y M. Jóźwiak, "Analysis of the Relationship Between Regulation Disorders of Sensory Processing (RDSP) and the Development of the Gait Function and Motor Learning Processes in Children and Adolescents with Cerebral Palsy", *Ortop Traumatol Rehabil*, vol. 24, núm. 2, pp. 107–119, 2022, doi: [10.5604/01.3001.0015.8268](https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.8268).
- [12] U. Givon, G. Zeilig, y A. Achiron, "Gait analysis in multiple sclerosis: Characterization of temporal-spatial parameters using GAITRite functional ambulation system", *Gait Posture*, vol. 29, núm. 1, pp. 138–142, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.07.011>.
- [13] T. Amundsen, M. Rossman, I. Ahmad, A. Clark, y M. Huber, "Fall risk assessment and visualization through gait analysis", *Smart Health*, vol. 25, p. 100284, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2022.100284>.
- [14] J. S. Brach, J. E. Berlin, J. M. VanSwearingen, A. B. Newman, y S. A. Studenski, "Too much or too little step width variability is associated with a fall history in older persons who walk at or near normal gait speed", *J Neuroeng Rehabil*, vol. 2, 2005, doi: [10.1186/1743-0003-2-21](https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-21).
- [15] J. K. Aggarwal y Q. Cai, "Human Motion Analysis: A Review", *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 73, núm. 3, pp. 428–440, 1999, doi: <https://doi.org/10.1006/cviu.1998.0744>.
- [16] K. L. Martin et al., "Cognitive function, gait, and gait variability in older people: A population-based study", *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, vol. 68, núm. 6, pp. 726–732, 2013, doi: [10.1093/geron/gls224](https://doi.org/10.1093/geron/gls224).
- [17] J. H. Valencia Mauricio Hernando Osorio, "Bases para el entendimiento del proceso de la marcha humana", *Archivos de Medicina (Col)*, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273828094009>
- [18] E. Nordin, R. Moe-Nilssen, A. Ramnemark, y L. Lundin-Olsson, "Changes in step-width during dual-task walking predicts falls", *Gait Posture*, vol. 32, núm. 1, pp. 92–97, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.03.012>.
- [19] B. Sidaway et al., "The identification of fall risk through tests of mediolateral stability during gait", *Exp Gerontol*, vol. 163, p. 111803, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.exger.2022.111803>.
- [20] F. Riva, M. C. Bisi, y R. Stagni, "Gait variability and stability measures: Minimum number of strides and within-session reliability", *Comput Biol Med*, vol. 50, pp. 9–13, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.04.001>.
- [21] S. Damouras, M. D. Chang, E. Sejdic, y T. Chau, "An empirical examination of detrended fluctuation analysis for gait data", *Gait Posture*, vol. 31, núm. 3, pp. 336 – 340, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.12.002>.
- [22] M. Jung y S. Koo, "Physical factors that differentiate body kinematics between treadmill and overground walking", *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 10, 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.888691>.
- [23] H. H. C. M. Savelberg, M. A. T. M. Vorstenbosch, E. H. Kamman, J. G. W. Van De Weijer, y H. C. Schabardt, "Intra-stride belt-speed variation affects treadmill locomotion", *Gait Posture*, vol. 7, núm. 1, pp. 26–34, 1998, doi: [10.1016/S0966-6362\(97\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(97)00023-4).
- [24] P. O. Riley, G. Paolini, U. Della Croce, K. W. Paylo, y D. C. Kerrigan, "A kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy subjects", *Gait Posture*, vol. 26, núm. 1, pp. 17–24, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.07.003>.
- [25] J. R. Watt, J. R. Franz, K. Jackson, J. Dicharry, P. O. Riley, y D. C. Kerrigan, "A three-dimensional kinematic and kinetic comparison of overground and treadmill walking in healthy elderly subjects", *Clinical Biomechanics*, vol. 25, núm. 5, pp. 444–449, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2009.09.002>.
- [26] M. B. Semaan, L. Wallard, V. Ruiz, C. Gillet, S. Leteneur, y E. Simoneau-Buessinger, "Is treadmill walking biomechanically comparable to overground walking? A systematic review", *Gait Posture*, vol. 92, pp. 249–257, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.11.009>.
- [27] V. Bonnet et al., "Towards an affordable mobile analysis platform for pathological walking assessment", *Rob Auton Syst*, vol. 66, pp. 116–128, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.002>.
- [28] R. Sers, S. Forrester, E. Moss, S. Ward, J. Ma, y M. Zecca, "Validity of the Perception Neuron inertial motion capture system for upper body motion analysis", *Measurement (Lond)*, vol. 149, 2020, doi: [10.1016/j.measurement.2019.107024](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107024).
- [29] S. Damouras, M. D. Chang, E. Sejdic, y T. Chau, "An empirical examination of detrended fluctuation analysis for gait data", *Gait Posture*, vol. 31, núm. 3, pp. 336 – 340, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.12.002>.
- [30] R. M. Nagymáté Gergely AND Kiss, "Affordable gait analysis using augmented reality markers", *PLoS One*, vol. 14, núm. 2, pp. 1–15, sep. 2019, doi: [10.1371/journal.pone.0212319](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319).
- [31] S. Kim, J. Lee, y J. Bae, "Analysis of Finger Muscular Forces using a Wearable Hand Exoskeleton System", *J Bionic Eng*, vol. 14, núm. 4, pp. 680–691, 2017, doi: [10.1016/S1672-6529\(16\)60434-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(16)60434-1).
- [32] K. and S. F. and D. S. Aurbach Maximilian and Wagner, "Implementation and Validation of Human Kinematics Measured Using IMUs for Musculoskeletal Simulations by the Evaluation of Joint Reaction Forces", en *Proceedings of the International Conference on Medical and Biological Engineering*, Singapore, 2017, pp. 205–211. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4166-2_31
- [33] R. V. Vitali y N. C. Perkins, "Determining anatomical frames via inertial motion capture: A survey of methods", *J Biomech*, vol. 106, p. 109832, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.109832>.
- [34] W. Y. Wong, M. S. Wong, y K. H. Lo, "Clinical applications of sensors for human posture and movement analysis: A review", *Prosthet Orthot Int*, vol. 31, núm. 1, pp. 62–75, 2007, doi: [10.1080/03093640600983949](https://doi.org/10.1080/03093640600983949).
- [35] Y. H. Bolaños, C. F. Rengifo, P. E. Caicedo, L. E. Rodriguez, y W. A. Sierra, "Electronic system for step width estimation using programmable system-on-chip technology and time of flight cameras", *HardwareX*, vol. 8, 2020, doi: [10.1016/j.ohx.2020.e00126](https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00126).
- [36] A. Botros, N. Gyger, N. Schütz, M. Single, T. Nef, y S. M. Gerber, "Contactless gait assessment in home-like environments", *Sensors*, vol. 21, núm. 18, 2021, doi: [10.3390/s21186205](https://doi.org/10.3390/s21186205).
- [37] K. Yagi, Y. Sugiura, K. Hasegawa, y H. Saito, "Gait Measurement at Home Using A Single RGB Camera", *Gait Posture*, vol. 76, pp. 136–140, 2020, doi: [10.1016/j.gaitpost.2019.10.006](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.10.006).
- [38] E. E. Stone y M. Skubic, "Unobtrusive, continuous, in-home gait measurement using the Microsoft Kinect", *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 60, núm. 10, pp. 2925–2932, 2013, doi: [10.1109/TBME.2013.2266341](https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2266341).
- [39] A. Aguirre, S. D. Sierra M., M. Munera, y C. A. Cifuentes, "Online System for Gait Parameters Estimation Using a LRF Sensor for Assistive Devices", *IEEE Sens J*, vol. 21, núm. 13, pp. 14272–14280, 2021, doi: [10.1109/JSEN.2020.3028279](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3028279).
- [40] R. A. Clark, K. J. Bower, B. F. Mentiplay, K. Paterson, y Y. H. Pua, "Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait variables", *J Biomech*, vol. 46, núm. 15, pp. 2722–2725, oct. 2013, doi: [10.1016/J.JBIOMECH.2013.08.011](https://doi.org/10.1016/J.JBIOMECH.2013.08.011).
- [41] A. Pfister, A. M. West, S. Bronner, y J. A. Noah, "Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis", *J Med Eng Technol*, vol. 38, núm. 5, pp. 274–280, 2014, doi: [10.3109/03091902.2014.909540](https://doi.org/10.3109/03091902.2014.909540).
- [42] J. van Kersbergen et al., "Camera-based objective measures of Parkinson's disease gait features", *BMC Res Notes*, vol. 14, núm. 1, pp. 1–6, 2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s13104-021-05744-z>.
- [43] V. Cimolin et al., "Computation of Gait Parameters in Post Stroke and Parkinson & rsquo;s Disease: A Comparative Study Using RGB-D Sensors and Optoelectronic Systems", *Sensors*, vol. 22, núm. 3, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22030824>.
- [44] M. D. C. Vilas-Boas et al., "Validation of a Single RGB-D Camera for Gait Assessment of Polyneuropathy Patients", *Sensors* 2019, Vol. 19, Page 4929, vol. 19, núm. 22, p. 4929, nov. 2019, doi: [10.3390/S19224929](https://doi.org/10.3390/S19224929).
- [45] M. do C. Vilas-Boas et al., "Portable RGB-D Camera-Based System for Assessing Gait Impairment Progression in ATTRv Amyloidosis",

- Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 10203, vol. 12, núm. 20, p. 10203, oct. 2022, doi: 10.3390/APPI22010203.
- [46] Y. Yang, F. Pu, Y. Li, S. Li, Y. Fan, y D. Li, "Reliability and validity of Kinect RGB-D sensor for assessing standing balance", IEEE Sens J, vol. 14, núm. 5, pp. 1633–1638, 2014, doi: 10.1109/JSEN.2013.2296509.
- [47] D. J. Geerse, B. H. Coolen, y M. Roerdink, "Kinematic Validation of a Multi-Kinect v2 Instrumented 10-Meter Walkway for Quantitative Gait Assessments", PLoS One, vol. 10, núm. 10, p. e0139913, oct. 2015, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0139913.
- [48] K. Otte et al., "Accuracy and Reliability of the Kinect Version 2 for Clinical Measurement of Motor Function", PLoS One, vol. 11, núm. 11, p. e0166532, nov. 2016, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0166532.
- [49] C. Posner, A. Sánchez-Mompó, I. Mavromatis, y M. Al-Ani, "A dataset of human body tracking of walking actions captured using two Azure Kinect sensors", Data Brief, vol. 49, p. 109334, ago. 2023, doi: 10.1016/J.DIB.2023.109334.
- [50] A. Grobelny et al., "Maximum walking speed in multiple sclerosis assessed with visual perceptive computing", PLoS One, vol. 12, núm. 12, dic. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0189281.
- [51] Z. R. Tsai, C. C. Kuo, C. J. Wang, J. J. P. Tsai, y H. H. Chou, "Validation of Gait Measurements on Short-Distance Walkways Using Azure Kinect DK in Patients Receiving Chronic Hemodialysis", Journal of Personalized Medicine 2023, Vol. 13, Page 1181, vol. 13, núm. 7, p. 1181, jul. 2023, doi: 10.3390/JPM13071181.
- [52] F. Gholami, D. A. Trojan, J. Kovacs, W. M. Haddad, y B. Gholami, "A Microsoft Kinect-Based Point-of-Care Gait Assessment Framework for Multiple Sclerosis Patients", IEEE J Biomed Health Inform, vol. 21, núm. 5, pp. 1376–1385, sep. 2017, doi: 10.1109/JBHI.2016.2593692.
- [53] B. Galna, G. Barry, D. Jackson, D. Mhiripiri, P. Olivier, y L. Rochester, "Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease", Gait Posture, vol. 39, núm. 4, pp. 1062–1068, abr. 2014, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2014.01.008.
- [54] R. A. Clark et al., "Reliability and concurrent validity of the Microsoft Xbox One Kinect for assessment of standing balance and postural control", Gait Posture, vol. 42, núm. 2, pp. 210–213, jul. 2015, doi: 10.1016/J.GAITPOST.2015.03.005.
- [55] J. Chhor, Y. Gong, y P. L. P. Rau, "Breakout: Design and evaluation of a serious game for health employing intel realsense", Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), vol. 10281, pp. 531–545, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-57931-3_42/FIGURES/8.
- [56] A. Baldominos, Y. Saez, y C. G. Del Pozo, "An Approach to Physical Rehabilitation Using State-of-the-art Virtual Reality and Motion Tracking Technologies", Procedia Comput Sci, vol. 64, pp. 10–16, ene. 2015, doi: 10.1016/J.PROCS.2015.08.457.
- [57] M. A. Cidota, S. G. Lukosch, P. Dezentje, P. J. M. Bank, H. K. Lukosch, y R. M. S. Clifford, "Serious Gaming in Augmented Reality using HMDs for Assessment of Upper Extremity Motor Dysfunctions: User Studies for Engagement and Usability", i-com, vol. 15, núm. 2, pp. 155–169, ago. 2016, doi: 10.1515/ICOM-2016-0020.
- [58] A. Bandini, A. Namasivayam, y Y. Yunusova, "Video-based tracking of jaw movements during speech: Preliminary results and future directions", Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH, vol. 2017-August, pp. 689–693, 2017, doi: 10.21437/INTERSPEECH.2017-1371.
- [59] V. Silva, F. Soares, J. S. Esteves, J. Figueiredo, C. Santos, y A. P. Pereira, "Happiness and sadness recognition system—preliminary results with an Intel RealSense 3D sensor", Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 402, pp. 385–395, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-43671-5_33/FIGURES/7.
- [60] L.-F. Yeung, Z. Yang, K. C.-C. Cheng, D. Du, y R. K.-Y. Tong, "Effects of camera viewing angles on tracking kinematic gait patterns using Azure Kinect, Kinect v2 and Orbbec Astra Pro v2", Gait Posture, vol. 87, pp. 19–26, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.04.005.
- [61] D. Guffanti, A. Brunete, y M. Hernando, "Development and validation of a ROS-based mobile robotic platform for human gait analysis applications", Rob Auton Syst, vol. 145, p. 103869, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103869.
- [62] R. and B. J. A. and D. N. and V. D. L. J. and V. B. and V. B. and S. P. Filtjens Benjamin and Amsters, "Vision-Based Marker-Less Spatiotemporal Gait Analysis by Using a Mobile Platform: Preliminary Validation", en Information and Communication Technologies for Ageing Well and e-Health, M. and M. L. A. Bamidis Panagiotis D. and Ziefle, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 126–141. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15736-4_7
- [63] H. Zhang, Z. Chen, D. Zanotto, y Y. Guo, "Robot-Assisted and Wearable Sensor-Mediated Autonomous Gait Analysis", en 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, pp. 6795–6802. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197571.
- [64] D. Guffanti, A. Brunete, M. Hernando, J. Rueda, y E. Navarro, "ROBOGait: A Mobile Robotic Platform for Human Gait Analysis in Clinical Environments", Sensors, vol. 21, núm. 20, 2021, doi: 10.3390/s21206786.
- [65] A. Scheidig et al., "May i keep an eye on your training? gait assessment assisted by a mobile robot", IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, vol. 2019-June, pp. 701–708, jun. 2019, doi: 10.1109/ICORR.2019.8779369.
- [66] Y. Guo, F. Deligianni, X. Gu, y G. Z. Yang, "3-D Canonical Pose Estimation and Abnormal Gait Recognition with a Single RGB-D Camera", IEEE Robot Autom Lett, vol. 4, núm. 4, pp. 3617–3624, oct. 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2928775.
- [67] R. Saegusa, "Human-Interactive Robot for Gait Evaluation and Navigation", 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2017, vol. 2017-January, pp. 1693–1698, nov. 2017, doi: 10.1109/SMC.2017.8122859.
- [68] J. Paulo, P. Peixoto, y U. J. Nunes, "ISR-AIWALKER: Robotic Walker for Intuitive and Safe Mobility Assistance and Gait Analysis", IEEE Trans Hum Mach Syst, vol. 47, núm. 6, pp. 1110–1122, dic. 2017, doi: 10.1109/THMS.2017.2759807.
- [69] E. Röhner et al., "Mobile Robot-Based Gait Training after Total Hip Arthroplasty (THA) Improves Walking in Biomechanical Gait Analysis", J Clin Med, vol. 10, núm. 11, jun. 2021, doi: 10.3390/JCM10112416.
- [70] B. Galna et al., "Retraining function in people with Parkinson's disease using the Microsoft Kinect: Game design and pilot testing", J Neuroeng Rehabil, vol. 11, núm. 1, pp. 1–12, abr. 2014, doi: 10.1186/1743-0003-11-60/TABLES/8.



Daniel Alberto Fernández Sabogal. Ingeniero Electrónico de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, 2020, Popayán, Colombia. Candidato a Magíster en Automática de la Universidad del Cauca. Joven Investigador e Innovador y miembro del Grupo de Investigación en Automática de la Universidad del Cauca. Áreas de interés: Análisis de la marcha humana, robótica, sistemas de control. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9237-4172.



Carlos Felipe Rengifo Rodas. Ingeniero Eléctrico, 1996, Cali. Magíster en Automática, 2000, de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Automática, 2007, Nantes, Francia. Doctor en Automática, Robótica, Tratamiento de Señal e Informática Aplicada, 2010, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, Francia. Profesor universitario, formación sólida en educación superior, que ofrece más de 20 años de experiencia. Competente en inglés, robótica, programación, investigación y docencia. Áreas de interés: Cinemática, Análisis de la marcha humana, Robótica, Entornos virtuales, Ingeniería de sistemas de control. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0601-3481.



Pablo Eduardo Caicedo Rodríguez. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, 2004, Popayán. Magíster en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, 2011, Popayán. Doctor en Ciencias de la Electrónica de la Universidad del Cauca, 2019, Popayán. Profesor e Investigador de la Facultad de Ingeniería Biomédica de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá DC. Áreas de interés: Cinemática, Robótica, Procesamiento de imágenes. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5000-9623.