

Comparison of intrusive and non-intrusive motion capture technologies for upper body kinematic analysis

Gerardo Moreno, Bachelor's Degree¹, Cristian Pinzón, Doctoral Degree², Manuel Ferre, Doctoral Degree³

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, gerardo.moreno2@utp.ac.pa

²Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, cristian.pinzon@utp.ac.pa

³Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC, Universidad Politécnica de Madrid, España, m.ferre@upm.es

Abstract- The adaptation of machine vision solutions for motion capture has generated an interest in determining whether markerless capture methods can achieve a level of accuracy particularly similar to capture techniques with passive or active markers, being an essential factor for the identification and treatment of motor weaknesses in physiotherapeutic fields. In this sense, the aim of this work is to perform a comparison of two motion capture techniques: intrusive and non-intrusive, using the 3D tracking systems OptiTrack and MediaPipe to determine the performance of markerless pose estimation in obtaining the ranges of motion (ROM) of the upper body of a person. The capture is simulated using a virtual environment (VE) developed on the Unity platform, evaluating accuracy and deviation levels using Matlab. The non-intrusive pose estimation solution generated 92.82% average accuracy with respect to the standard trajectory when capturing the ROMs of the limb, proving to be a cost-effective and significantly accurate option for the analysis of upper body kinematics in rehabilitation exercises. The study of the elbow joint indicated similar results in flexion, with 1.382° degrees difference as did the shoulder joint, with 1.237° and 2.969° degrees in flexion and abduction, respectively. Finally, the captured ROMs demonstrate that the integration of a VE decreases the deviation in the trajectory of the limb, guiding the participant in the presented exercise.

Keywords- Motion capture, kinematics, virtual environment, upper extremities, machine vision.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Comparación de tecnologías de captura de movimiento intrusivas y no intrusivas para el análisis cinemático del tren superior

Gerardo Moreno, Bachelor's Degree¹, Cristian Pinzón, Doctoral Degree², Manuel Ferre, Doctoral Degree³

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, gerardo.moreno2@utp.ac.pa

²Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, cristian.pinzon@utp.ac.pa

³Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC, Universidad Politécnica de Madrid, España, m.ferre@upm.es

Resumen— La adaptación que poseen las soluciones de visión artificial para la captura de movimiento genera un interés por determinar si los métodos de captura sin marcadores pueden lograr un nivel de precisión particularmente similar a las técnicas de captura con marcadores pasivos o activos, siendo un factor imprescindible en la identificación y el tratamiento de debilidades motoras en campos fisioterapéuticos. En este sentido, el objetivo de este trabajo es realizar una comparativa en dos técnicas de captura de movimiento: intrusivas y no intrusivas, empleado los sistemas de seguimiento 3D OptiTrack y MediaPipe para determinar el rendimiento que presenta la estimación de pose sin marcadores al obtener los rangos de movimiento (ROM) del tren superior de una persona. La captura es simulada por medio de un entorno virtual (VE) desarrollado en la plataforma Unity, evaluando los niveles de precisión y desviación mediante Matlab. La solución de estimación de pose no intrusiva generó un 92.82% de precisión promedio con respecto a la trayectoria estándar al capturar los ROM de la extremidad, demostrando ser una opción económica y significativamente precisa para el análisis de la cinemática del tren superior en ejercicios de rehabilitación. El estudio de la articulación del codo indicó resultados similares en la flexión, con 1.382° grados de diferencia al igual que la articulación del hombro, con 1.237° y 2.969° grados en la flexión y abducción, respectivamente. Finalmente, los ROM capturados demuestran que la integración de un VE disminuye la desviación en la trayectoria de la extremidad, guiando al participante en el ejercicio presentado.

Keywords— Captura de movimiento, cinemática, entorno virtual, extremidades superiores, visión artificial.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis cinemático de los miembros superiores es fundamental para el tratamiento de las debilidades que afectan al sistema musculoesquelético o locomotor del cuerpo humano [1]. Estas áreas de la rehabilitación tienen como objetivo determinar la capacidad del rango de movimiento (ROM) que posee una extremidad con respecto al estándar de un paciente sano, empleando un conjunto de herramientas que definen las trayectorias de cinemática del usuario. Si bien en las últimas décadas se han obtenido más herramientas enfocadas en el estudio cinemático del tren inferior o análisis de la marcha como es mencionado en [2], las nuevas tecnologías han generado una inclinación por el desarrollo de algoritmos y métodos que permiten la observación del tren superior tomando como relación el movimiento del hombro, codo, muñeca y manos.

Los sistemas centrados en el estudio de la cinemática del tren superior generalmente emplean equipos asistidos como órtesis para contrarrestar enfermedades degenerativas [3]. Otros sistemas integran exoesqueletos flexibles como en [4] y [5] para producir una fuerza que apoye al paciente. A su vez, se integran sensores de movimiento, Unidades de Medición Inercial (IMU) y sensores Electromiográficos (EMG) para obtener las variables que puedan producir una desviación en la trayectoria estudiadas [6]. Estudios como [7] dan a conocer el concepto de las tecnologías intrusivas y no intrusivas, teniendo una mayor presencia en la captura de movimiento como resultado de la gran precisión que conlleva esta técnica.

Esto genera algunos trabajos como [8] donde se comparan ambas tecnologías para el análisis de la marcha. Por un lado, la captura de movimiento intrusiva o con marcadores activos y pasivos es una de las técnicas más utilizadas en el análisis cinemático del cuerpo al ser un método más sólido y seguro. Sin embargo, el nivel de precisión es proporcional a la cantidad de cámaras que serán empleadas al capturar los datos, y poseen un costo elevado en comparación a otras técnicas como los sensores IMU. Por otra parte, la captura de movimiento no intrusiva o sin marcadores se respalda de algoritmos de visión artificial entrenados por lo que no es necesario calibrar un conjunto de cámaras especializadas. Si bien la visión artificial puede entregar un método más económico, suele requerir de un entorno controlado por la sensibilidad que presentan los modelos al nivel de luz y a la calidad de la cámara. Dependiendo de los métodos utilizados, la captura de movimiento intrusiva y no intrusiva puede contribuir positivamente al estudio cinemático del cuerpo humano.

En lo que se refiere al caso presentado, el uso de estas tecnologías para el análisis del tren superior en tareas de rehabilitación puede generar herramientas óptimas como [9] y [10] para el estudio y la recuperación de las debilidades motoras. En Panamá, la Secretaría Nacional de Discapacidad (SENADIS) registró en el primer semestre del año 2022 un total de 3,025 casos de pacientes que sufren de una discapacidad física. Esto se traduce en el 61% de personas afectadas por una discapacidad en el periodo indicado [11]. No obstante, las clínicas médicas en Panamá cuentan generalmente con herramientas robóticas de rehabilitación basadas en el soporte y la compensación del movimiento [12], por lo que el país no cuenta con muchos estudios significativos en las áreas de la captura de movimiento para el tren superior. Además, la Sala

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

de Rehabilitación Robótica para Extremidades Superiores del Instituto Nacional Medicina Física y Rehabilitación (INMFRE) [13] abrió sus servicios en el año 2022, dando consigo la oportunidad de desarrollar nuevas aplicaciones a la rehabilitación asistida por la tecnología.

Par dar una respuesta a esta problemática, se presenta un estudio comparativo de tecnologías de captura de movimiento intrusivas y no intrusivas utilizando cámaras OptiTrack con marcadores pasivos y tecnologías MediaPipe basadas en algoritmos de estimación de pose, empleando un entorno virtual (VE) desarrollado en Unity para la integración de ambas técnicas de captura. De este modo, se registran los grados del ROM de las extremidades superiores obtenidas por los participantes para ser evaluados posteriormente en Matlab de manera que sea posible determinar el rendimiento de los métodos no intrusivos en ejercicios de rehabilitación física.

El artículo ha sido estructurado de la siguiente manera. En la sección 1 se presenta la introducción del tema. La sección 2 se describen los materiales y métodos utilizados. En la sección 3 se analizan los resultados obtenidos de las pruebas y en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Configuración experimental

Se utilizó un sistema de cuatro cámaras OptiTrack PRIMEX13W posicionadas en dirección al área de captura de los participantes. La calibración de cada una de las cámaras fue efectuada como es indicada en la documentación oficial de Motive OptiTrack empleando una vara con tres esferas reflectantes para obtener la mayor calidad posible. Se registró un total de 2000 muestras por cada cámara en la configuración, obteniendo un error promedio de 0.498 milímetros y 0.139 píxeles, y se aplicaron máscaras manualmente para ocultar los objetos reflectantes que no son parte del sistema. Se fijó una cuadrícula de tres ejes a una altura de medio metro para determinar el eje de referencia. Tres conjuntos de marcadores reflectantes fueron impresos para determinar la posición del hombro, codo y muñeca para la flexión del codo como es mostrado en la Fig. 1.



Fig. 1. Participante utilizando el conjunto de marcadores en la extremidad.

Cada marcador se encuentra a cinco centímetros de distancia entre cada uno, utilizando un total de nueve

marcadores reflectantes. Una cuarta posición en la cadera sería generada para la captura del movimiento realizado en la flexión y abducción del hombro. Para las soluciones de estimación de pose con MediaPipe, se empleó una cámara SHDR [14] integrada al computador utilizado para realizar la captura de movimiento sin marcadores. Se configuró una frecuencia de 60 hercios (Hz) para obtener la mayor cantidad de imágenes en ópticas condiciones. La cantidad de fotogramas capturados es controlada con el VE en Unity para evitar un exceso de valores en el análisis de la cinemática realizada por el participante.

B. Captura de movimiento intrusiva

El sistema de captura apoyado por marcadores pasivos a estudiar está basado en las tecnologías OptiTrack [15] desarrollado por la compañía NaturalPoint como proveedor principal. Este sistema de captura de movimiento ha tenido una gran influencia en el estudio del movimiento cinemático del cuerpo humano, como es demostrado en [2] y [16]. Su capacidad de adaptación permite su uso en conjunto con otras tecnologías y sensores, además de aplicar diversas funciones como el filtrado o suavizado de trayectorias por medio de su plataforma oficial Motive.

La pose del participante fue grabada en tiempo real posicionando las cámaras en dirección al área de pruebas para definir cada uno de los conjuntos de marcadores como objetos rígidos en Motive. Estos conjuntos fueron configurados para crear las etiquetas que permitan reconocer las posiciones del tren superior mencionadas, registrando los cuaterniones tridimensionales que simulan la rotación y el movimiento de la pose expresando los grados de libertad (DoFs) de la extremidad.

Para visualizar los datos capturados por Motive, las grabaciones son exportadas en archivos FBX con los tres DoFs capturados al momento de que el participante realiza las pruebas. Estos archivos son transferidos al VE como un estándar de movimiento para su tratamiento posterior y su representación tridimensional, permitiendo al participante visualizar los ROM obtenidos.

C. Captura de movimiento no intrusiva

Las soluciones de Machine Learning (ML) para la captura de movimiento son un método aplicado generalmente para el desarrollo de contenido digital. Comúnmente, podemos encontrar su aplicación en filtros de cámara y la generación de avatares que simulan el movimiento capturado desde un dispositivo móvil o computador. Existen diversas soluciones de código abierto que integran aplicaciones de seguimiento de pose como OpenPose [17] y MediaPipe [18].

Para el estudio presentado, se emplean las soluciones de ML del Framework que provee MediaPipe a causa de una mejor compatibilidad presente en la plataforma Unity. Se integró el módulo MediaPipe: pose en Python [19] para generar los puntos de referencia que simulan la pose del participante como es demostrado en la Fig. 2, obteniendo la posición de cada una de las articulaciones del tren superior. Las coordenadas de la pose son enviadas consecutivamente al entorno de Unity para recrear la pose detectada.



Fig. 2. Puntos de referencia del tren superior generados por medio de MediaPipe.

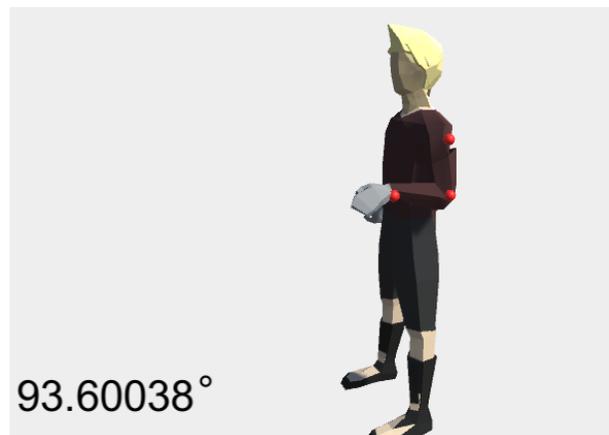


Fig. 3. Modelo tridimensional simulando la flexión del codo en el VE de Unity.

D. Sincronización y validación de las pruebas

La sincronización de los datos capturados es fundamental para comprobar el grado de precisión que poseen las técnicas de captura de movimiento estudiadas. Unity se ajusta correctamente a una solución para el funcionamiento simultáneo de ambos métodos, gracias a la posibilidad de crear un VE que simule los ROM realizados por los participantes. Se desarrolló una interfaz de usuario (UI) con el inspector de Unity para registrar la información capturada por la cámara SHDR y los DoFs generados por Motive. Cuatro participantes, descritos en la tabla I fueron seleccionados para capturar las trayectorias de movimiento.

TABLA I
DATOS DE LOS PARTICIPANTES

Participante	Edad	Género	Altura (cm)
1	23	H	178
2	27	H	191
3	26	M	163
4	48	M	156

Se le indicó al participante realizar 5 repeticiones sucesivas de los ejercicios de rehabilitación estudiados por el sistema: flexión del codo junto a la flexión y abducción del hombro, registrando un total de quince pruebas por cada participante. Un modelo 3D de una persona a escala fue agregado al escenario para representar el movimiento y el ángulo realizado por el participante, de manera que este pueda visualizar el ejercicio solicitado mientras el sistema captura los ROM en tiempo real como es mostrado en la Fig. 3. El estándar de movimiento capturado por Motive es activado junto con la estimación de pose de MediaPipe para registrar los ROM generados por ambas técnicas, evitando una desviación notable de los grados capturados al momento de analizar los resultados.

La naturaleza del VE recrea un escenario donde todos los objetos poseen tres dimensiones, incluyendo el modelo agregado al escenario. Por lo tanto, es conveniente expresar la localización de las articulaciones estudiadas en puntos tridimensionales, como se muestra en (1):

$$P_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (1)$$

Donde P_i es el punto tridimensional; x_i, y_i, z_i son las magnitudes de cada eje y en conjunto representan la posición en el VE tomando como referencia la altura del participante. En este contexto, se obtienen tres puntos tridimensionales que representan la posición del hombro, codo y muñeca del participante, de manera que sea posible generar un ángulo con respecto a los puntos tratados. Se definió un cuarto punto localizado en la cadera del participante utilizado en los ejercicios de la flexión y abducción del hombro para que sea posible calcular un ángulo referente al ROM analizado por el sistema, como es tratado en [20].

Al obtener los puntos de referencia, se calculó el ángulo mediante el producto escalar de dos vectores. Por lo cual se utiliza la fórmula en (2) para obtener los vectores a través de los puntos tridimensionales.

$$\vec{V} = P_i - P_j = (x_i - x_j, y_i - y_j, z_i - z_j) \quad (2)$$

Donde \vec{V} es el resultado de las coordenadas del vector desde el punto P_i al punto P_j , siendo estos los puntos tridimensionales del hombro y codo. Un segundo vector \vec{W} es obtenido al utilizar los puntos tridimensionales del codo y la muñeca. Seguidamente se aplica el producto escalar mostrado en (3) empleando los vectores \vec{V} y \vec{W} . La salida de la ecuación genera un ángulo en radianes con la inversa de la función coseno, resultando en un rango de 0° a 180° en referencia al ROM realizado al convertir el resultado en grados.

$$\cos \theta = \frac{\vec{V} \cdot \vec{W}}{\|\vec{V}\| \cdot \|\vec{W}\|} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

El registro de los datos obtenidos por (3) es representado por una aplicación de Matlab donde es posible apreciar la fase de elevación y el descenso de la extremidad. Los ángulos obtenidos por el ROM del participante son reducidos para definir las desviaciones al momento de estudiar la cinemática del movimiento con un aproximado de más de 7,000 fotogramas capturados por el sistema.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El nivel de precisión que presentó la solución de estimación de pose de MediaPipe fue determinado al analizar las sucesiones de ejercicios de rehabilitación realizados por los participantes. Con este fin, se determinó un estándar del movimiento a partir de los ROM capturados por el sistema de captura OptiTrack, el cual es utilizado como una animación que guía al participante en el movimiento que debe ejecutar.

Se tomó en cuenta la sensibilidad que presenta la captura de movimiento sin el uso de marcadores, por lo que las pruebas fueron realizadas en un entorno controlado con fondo blanco y una intensidad lumínica natural a una distancia de 2.45 metros de la cámara SHDR. Una vez que el participante terminó el ejercicio indicado, se tomó un descanso de tres minutos para evitar la fatiga muscular, identificar posibles errores en la captura de datos en Matlab y configurar la siguiente prueba a realizar en el VE. Al finalizar el periodo de tiempo indicado, se continuó con la siguiente prueba hasta terminar la sesión de captura de datos. La Fig. 4 muestra la sincronización de los datos capturados por el sistema mientras que el participante realiza el ejercicio como es indicado.

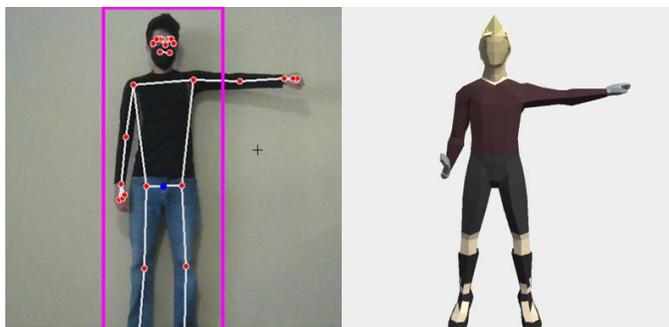


Fig. 4. Ejecución simultánea del método de captura de movimiento sin marcadores junto al VE.

Los resultados de los tres ejercicios estudiados son mostrados en la tabla II. Según estos, para el método de captura no intrusiva, la flexión del codo muestra los mejores resultados, con un 5.43% de desviación en los periodos de elevación y descenso de la extremidad. Una comparación directa con la técnica de captura intrusiva demuestra una diferencia de 1.382° y 2.778° grados en el valor máximo y mínimo alcanzado, respectivamente.

Los ROM de la flexión del codo muestran una similitud característica al comparar cada uno de los fotogramas en la Fig. 5. El método de captura sin marcadores es capaz de crear una animación al aplicar técnicas de cinemática inversa al modelo tridimensional, por lo que es posible mostrar un movimiento natural al participante en el VE.

Existe una desviación relevante en el periodo de descanso de la extremidad, donde la solución de MediaPipe no logra alcanzar el ángulo inicial promedio con respecto al obtenido con los marcadores. Esta perturbación en la trayectoria de los ROM se le atribuye a la posibilidad de que las articulaciones de la extremidad son afectadas por el posicionamiento del participante; al estar posicionado de manera perpendicular respecto a la cámara, la posición del codo puede llegar a cubrir parte del tronco central por lo que el sistema presenta dificultades para determinar la dirección de la extremidad. No obstante, se logró una similitud del 98.53% al comparar ambas técnicas en el periodo de flexión del codo manteniendo un ángulo de 90° grados con respecto al cuerpo.

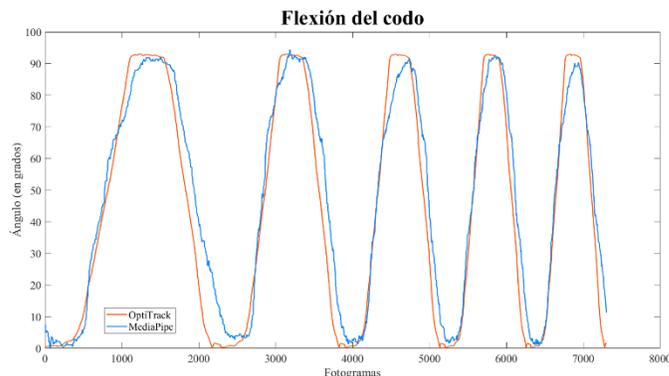


Fig. 5. Gráfica de los ROM capturados por ambas técnicas en la flexión del codo.

TABLA II
RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS TÉCNICAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

Ejercicio Realizado	Método de captura						
	Intrusiva			No Intrusiva			
	Ángulo Máximo	Ángulo Mínimo	Ángulo Promedio Inicial	Ángulo Máximo	Ángulo Mínimo	Ángulo Promedio Inicial	Fotogramas
Flexión del codo	93.037°	0.044°	1.987°	94.419°	2.822°	3.998°	7301
Flexión del hombro	89.631°	0.028	1.284°	90.868°	4.073°	6.969°	7120
Abducción del hombro	90.619°	0.034	1.379°	93.588°	14.681°	15.169°	7136

De acuerdo con los resultados, la flexión del hombro demostró un 6.57% de desviación en los periodos de elevación y descenso resaltando una diferencia de 1.237° grados en el valor máximo alcanzado el mayor punto de similitud con respecto al estándar estudiado. Los picos de la gráfica de la flexión del hombro revelan un ángulo máximo registrado de 90.868° grados en el periodo de flexión, lo que demuestra un nivel de precisión favorable para el estudio de la cinemática del tren superior. En contraste, se obtuvo una diferencia de 4.045° grados como valor mínimo alcanzado por el sistema y una similitud del 98.63% en los periodos de flexión del hombro. Las perturbaciones de los ROM en el ángulo inicial promedio son notables y presentan una elevación constante en la Fig. 6. La abducción del hombro es un claro ejemplo de este evento. Se determinó una desviación del 9.50% con respecto al estándar, siendo los resultados con las variantes más significativas. La técnica muestra una diferencia de 2.969° grados en el valor máximo y 14.647° grados para el valor mínimo. La gráfica de la Fig. 7 muestra una diferencia clara en los periodos de descanso del ejercicio. Sin embargo, no presenta una elevación constante como en los ejercicios de la flexión del hombro. Además, se obtuvo un 96.82% de similitud en los periodos de abducción del hombro, indicando un nivel significativo de precisión en las sucesiones del ejercicio.

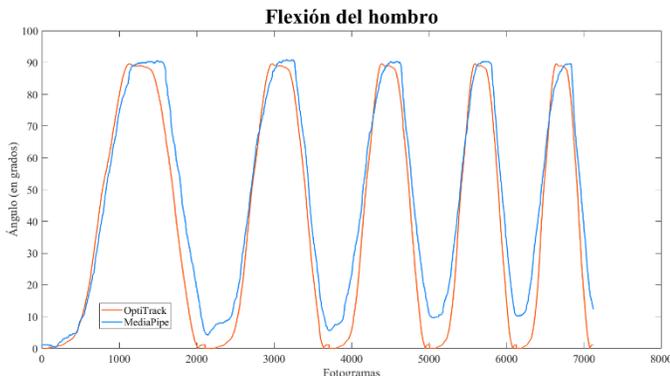


Fig. 6. Gráfica de los ROM capturados por ambas técnicas en la flexión del hombro.

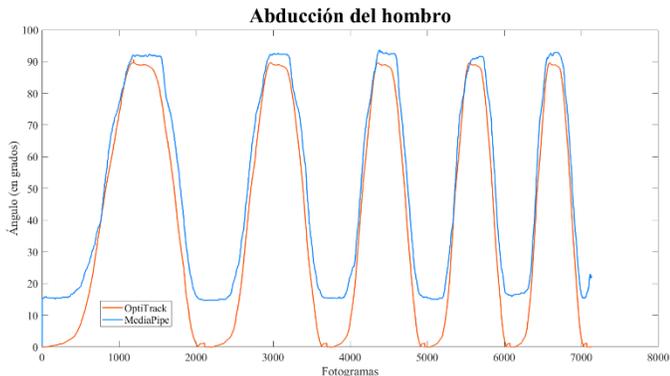


Fig. 7. Gráfica de los ROM capturados por ambas técnicas en la abducción del hombro.

IV. CONCLUSIONES

El estudio presentado comparó un sistema de captura de movimiento intrusivo basado en marcadores pasivos y un sistema de captura de movimiento no intrusivo apoyado por visión artificial, obteniendo los ROM y las trayectorias del movimiento cinemático del tren superior, logrando identificar una similitud del 92.82% en el nivel de precisión de la técnica no intrusiva. Por lo tanto, las soluciones de MediaPipe demuestran un alto rendimiento al momento de registrar los picos de flexión y abducción de las extremidades estudiadas, ofreciendo una opción eficaz para analizar el movimiento motor del cuerpo humano.

Ambos métodos de captura registraron trayectorias similares en la elevación o disminución de los ejercicios en las pruebas, resaltando algunas desviaciones al momento de finalizar el movimiento para dar inicio con la siguiente sucesión como es el caso de la abducción del hombro. Existen factores potenciales que dieran consigo las desviaciones presentadas en los resultados. No obstante, se tomaron precauciones para evitar un posible porcentaje de error al momento de capturar los ROM del participante, realizando cada una de las pruebas en el mismo escenario y manteniendo niveles de luz aceptables para el uso de las cámaras.

La solución de captura de movimiento no intrusiva demostró una sensibilidad favorable en comparación al método intrusivo obteniendo resultados casi iguales como es el caso de la flexión del hombro, con solo 1.237° grados de diferencia. En términos de aplicación, los participantes indican que el VE contribuyó en gran medida a la ejecución correcta del movimiento siguiendo las indicaciones que se mostraban en pantalla, de modo que es posible integrar esta solución en el estudio de la cinemática del tren superior para futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue realizada gracias al apoyo de la Universidad Politécnica de Madrid, en el Centro de Automática y Robótica UPM-CSIC junto al equipo técnico encargado de los sistemas de captura OptiTrack.

REFERENCIAS

- [1] A. M. Valevicius, P. Y. Jun, J. S. Hebert, and A. H. Vette, "Use of optical motion capture for the analysis of normative upper body kinematics during functional upper limb tasks: A systematic review," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 40, pp. 1–15, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2018.02.011>.
- [2] G. Nagymate and R. Kiss, "Application of OptiTrack motion capture systems in human movement analysis A systematic literature review," *Recent Innov. Mechatronics*, vol. 5, 2018, doi: 10.17667/riim.2018.1/13.
- [3] K. Ghoseiri, B. Forogh, M. Ali Sanjari, and A. Bavi, "Effects of vibratory orthosis on balance in idiopathic Parkinson's disease," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 58–63, Jan. 2009, doi: 10.1080/17483100802542868.
- [4] J. L. Samper-Escudero, A. Giménez-Fernández, M. Á. Sánchez-Urán, and M. Ferre, "A Cable-Driven Exosuit for Upper Limb Flexion Based on Fibres Compliance," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153297–153310, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018418.
- [5] M. Ferre et al., "ExoFlex: An Upper-Limb Cable-Driven Exosuit," *Robot 2019 Fourth Iber. Robot. Conf. Robot. Adv. Intell. Syst. Comput.*,

- vol. 1093, pp. 417–428, [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36150-1_34#citeas
- [6] J. L. Samper-Escudero, A. F. Contreras-González, M. Ferre, M. A. Sánchez-Urán, and D. Pont-Esteban, “Efficient Multiaxial Shoulder-Motion Tracking Based on Flexible Resistive Sensors Applied to Exosuits,” *Soft Robot.*, vol. 7, no. 3, pp. 370–385, Jan. 2020, doi: 10.1089/soro.2019.0040.
- [7] L. Mündermann, S. Corazza, and T. P. Andriacchi, “The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 3, no. 1, p. 6, 2006, doi: 10.1186/1743-0003-3-6.
- [8] R. M. Kanko, E. K. Laende, E. M. Davis, W. S. Selbie, and K. J. Deluzio, “Concurrent assessment of gait kinematics using marker-based and markerless motion capture,” *J. Biomech.*, vol. 127, p. 110665, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110665>.
- [9] C. D. Metcalf et al., “Markerless Motion Capture and Measurement of Hand Kinematics: Validation and Application to Home-Based Upper Limb Rehabilitation,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 60, no. 8, pp. 2184–2192, 2013, doi: 10.1109/TBME.2013.2250286.
- [10] W. W. T. Lam and K. N. K. Fong, “The application of markerless motion capture (MMC) technology in rehabilitation programs: a systematic review and meta-analysis,” *Virtual Real.*, 2022, doi: 10.1007/s10055-022-00696-6.
- [11] Secretaría Nacional de Discapacidad, “Boletín Estadístico 2022,” Panamá, 2022. [Online]. Available: https://www.senadis.gob.pa/documentos/estadisticas/BoletinEstadistico-2022_01.pdf
- [12] Centro de Medicina Física y Rehabilitación, “The Panama Clinic,” 2020. <https://thepanamaclinic.com/centro-de-medicina-fisica-y-rehabilitacion/>
- [13] V. Villar Liste, “Panamá, el primer país de Centroamérica y Caribe con una clínica pública de alta robótica para rehabilitación física,” Panamá, 2022. [Online]. Available: <https://lawebdelasalud.com/panama-el-primer-pais-de-centroamerica-y-caribe-con-una-clinica-publica-de-alta-robotica-para-rehabilitacion-fisica/>
- [14] T. Hayami, M. Tanaka, M. Okutomi, T. Shibata, and S. Senda, “Super-high Dynamic Range Imaging,” in 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition, 2014, pp. 720–725. doi: 10.1109/ICPR.2014.134.
- [15] NaturalPoint, “OptiTrack: Motion Capture System,” 2022. <https://optitrack.com/>
- [16] S. Zhang, B. Y. Tan, K. H. Leo, and R. Q. F. Tham, “A hybrid human motion tracking system for virtual rehabilitation,” in 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011, pp. 1993–1998. doi: 10.1109/ICIEA.2011.5975919.
- [17] Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S. Wei, and Y. Sheikh, “OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields,” *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, vol. 43, no. 01, pp. 172–186, 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2929257.
- [18] C. Lugaresi et al., “MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines.” arXiv, 2019. doi: 10.48550/ARXIV.1906.08172.
- [19] P. S. Foundation, “MediaPipe: Live ML anywhere,” 2023. <https://pypi.org/project/mediapipe/>
- [20] H. J. Hislop and J. Montgomery, *Daniels-Worthingham’s: Pruebas funcionales musculares : Técnicas de exploración manual*, 6a ed. Madrid: Marban, 1999.