

Diseño y evaluación cinemática de una articulación mecánica para la movilización del tobillo

Antonio J. del-Ama^{a,b}, Víctor Gómez-Tavira^b, Ángel Gil-Agudo^a, Álvaro Megía-Carpintero^a

^aUnidad de Biomecánica y Ayudas Técnicas, Hospital Nacional de Paraplégicos. Finca La Peraleda S/N, 45071, Toledo. ^bEscuela de Ingenierías Industrial de Toledo, Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. Carlos III, 45071, Toledo

Resumen

Los exoesqueletos robóticos para la asistencia de la marcha está siendo objeto de investigación en cuanto a sus efectos el usuario. La totalidad de exoesqueletos para aplicaciones clínicas poseen un único grado de libertad en la articulación del tobillo en el plano sagital, siendo los restantes responsables del mantenimiento del equilibrio y de la capacidad de adaptación a diferentes superficies. Este trabajo presenta un nuevo concepto de articulación mecánica para la movilización del tobillo basada en la plataforma de Stewart. Consiste en una plataforma unida mediante articulaciones esféricas a tres actuadores lineales, ajustables en longitud, que permite dotar al efector final de 6 grados de libertad. Se evaluó la compatibilidad cinemática mediante comparando la cinemática de la articulación del tobillo con y sin exoesqueleto durante marcha por superficie lisa, y a través de un plano inclinado. Los resultados muestran una leve alteración de los patrones cinemáticos entre ambas condiciones en los dos experimentos realizados. En cualquier caso, el uso de un dispositivo externo, aunque proporcione total libertad de movimientos a la articulación, sigue imponiendo una perturbación a la marcha de la persona

Palabras clave: exoesqueleto, diseño mecánico, articulación, marcha, tobillo

1. Introducción

Una de las consecuencias de las enfermedades neurológicas es la afectación de la capacidad de marcha. La utilización de exoesqueletos robóticos para la rehabilitación la compensación funcional de la capacidad de marcha está siendo objeto de investigación en cuanto a sus efectos sobre la capacidad de marcha del usuario y el impacto en la calidad de vida [1], [2]. Estos sistemas han demostrado ser seguros, tolerados por los pacientes y proporcionar ciertas mejoras en la función de la marcha [2]–[5].

La totalidad de exoesqueletos para aplicaciones clínicas poseen un único grado de libertad en la articulación del tobillo en el plano sagital. Si bien este grado de libertad es responsable de la generación de la mayor parte del movimiento, los restantes grados de libertad de la articulación son responsables del mantenimiento del equilibrio y de dotar al tobillo de la capacidad de adaptación a diferentes superficies. Por otra parte, esta restricción en los grados de libertad limita la compatibilidad cinemática con el tobillo fisiológico, que pudiera asemejarse al que tendrá una articulación con tres grados de libertad cilíndricos, situados sobre el mismo plano a la altura del astrágalo). Realizar un diseño mecánico que dote de movimiento controlado en estos tres grados de libertad es un desafío que todavía no ha sido resuelto. En este trabajo presentamos el diseño preliminar de una nueva articulación mecánica que proporcione una compatibilidad cinemática total con la articulación fisiológica.

2. Material y Métodos

2.1. Diseño

La articulación propuesta se basa en el concepto de mecanismo plataforma de Stewart. Consiste en una plataforma triangular circular, unida mediante articulaciones esféricas a tres actuadores lineales, ajustables en longitud. Estos se encuentran, a su vez, conectados a una base fija mediante articulaciones universales. La arquitectura de la plataforma Stewart tal y como se conoce en la actualidad, consiste en una base fija, y una base superior móvil, conectada en al menos 3 puntos con los actuadores lineales. Esta base móvil se conecta con la base fija por medio de 6 actuadores, que a su vez están enganchados mediante articulaciones esféricas a un lado y universales al otro. Por su geometría, permite que su plataforma móvil tenga 6 GDL, rotación y

traslación en los ejes x, y y z. Es decir, la plataforma superior tiene la misma movilidad que si no tuviera ninguna restricción en el espacio, acotado a su espacio de trabajo correspondiente.

La solución mecánica propuesta se muestra en la Figura 1. Se trata de un mecanismo compuesto por cuatro actuadores lineales, que serán los encargados de realizar los movimientos de giro en ambos ejes. La unión entre estos actuadores y las bases (tanto la superior como la inferior), se implementa mediante una articulación esférica. El diseño de los alojamientos de las articulaciones esféricas permite implementar límites mecánicos en los grados de libertad de flexión dorsal-plantar y de inversión-eversión, mediante interferencia entre el émbolo del actuador y el alojamiento.



Figura 1. Vista isométrica del mecanismo propuesto.

A partir del concepto propuesto, se añaden la plantilla del mecanismo, así como un mecanismo que facilite el vestido/desvestido del mismo (Figura 2)

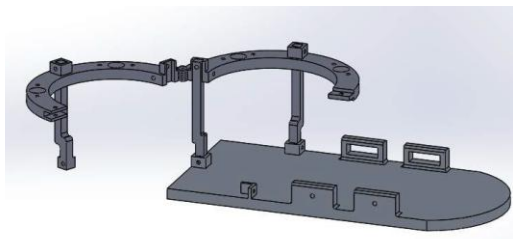


Figura 2. Vista de la plantilla y el mecanismo para vestir/desvestir.

2.2. Evaluación cinemática

Para evaluar la compatibilidad cinemática, se realizaron pruebas experimentales en las que se comparó el movimiento de la articulación del tobillo con y sin exoesqueleto en dos escenarios diferentes: marcha por superficie lisa (figura 4), y marcha a través de un plano inclinado (Figura 5)

Se utilizaron 4 sensores inerciales (TechMCS, Technaid, Argoda del Rey, Madrid, España) ubicados en la pierna y el pie de un voluntario sano. Se procedió a vestir y ajustar el mecanismo a la pierna y pie del usuario,

y se realizaron las mediciones. En la Figura 3 se puede comprobar la ubicación de las unidades de medida inercial.

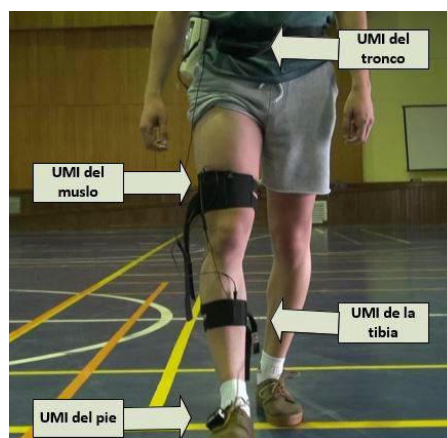


Figura 3. Ubicación de las unidades de medida inercial.



Figura 4. Vista frontal y lateral del experimento sobre superficie plana.



Figura 5. Vista frontal del experimento sobre superficie inclinada.

2.3. Análisis de datos.

Para comprobar la compatibilidad cinemática, se exportaron el ángulo de la articulación del tobillo proporcionado por las unidades de medida inercial. Se segmentaron los pasos mediante un algoritmo diseñado ad-hoc. Posteriormente se normalizaron los datos de 0 a 100% de ciclo de marcha entre dos contactos iniciales sucesivos, y se promediaron las curvas entre sí, obteniendo una curva promedio por cada condición. Se calculó además el valor promedio cuadrático de las curvas.

3. Resultados

En la figura 6 se muestra el resultado de uno de los experimentos una vez aplicado el algoritmo de segmentación de la marcha. Los asteriscos negros representan el contacto inicial detectado por el algoritmo.

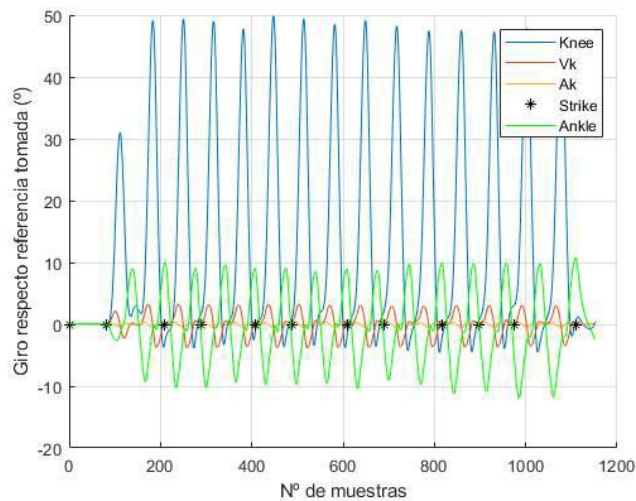


Figura 6: posición, velocidad y aceleración del tobillo en el plano sagital, y detección automática de contacto inicial.

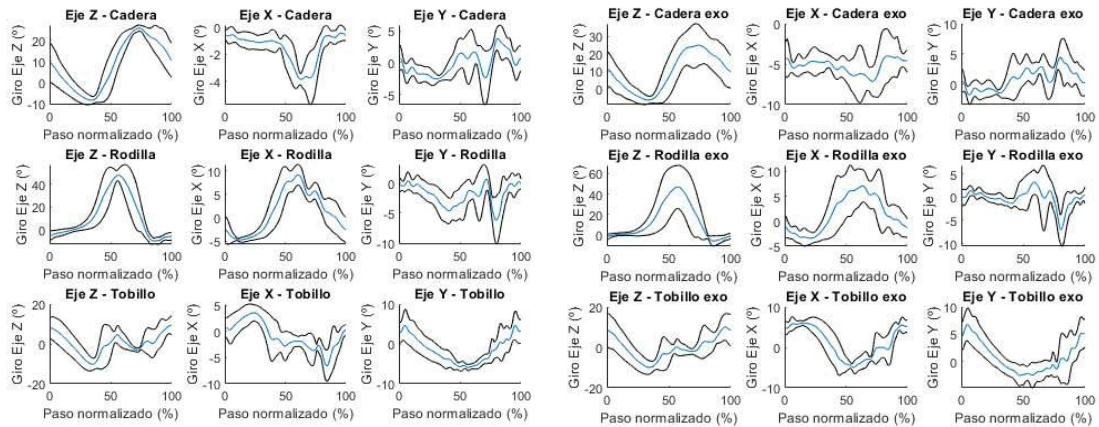


Figura 7. Cinemática articular sin mecanismo (izquierda) y con mecanismo (derecha) durante marcha en superficie plana.

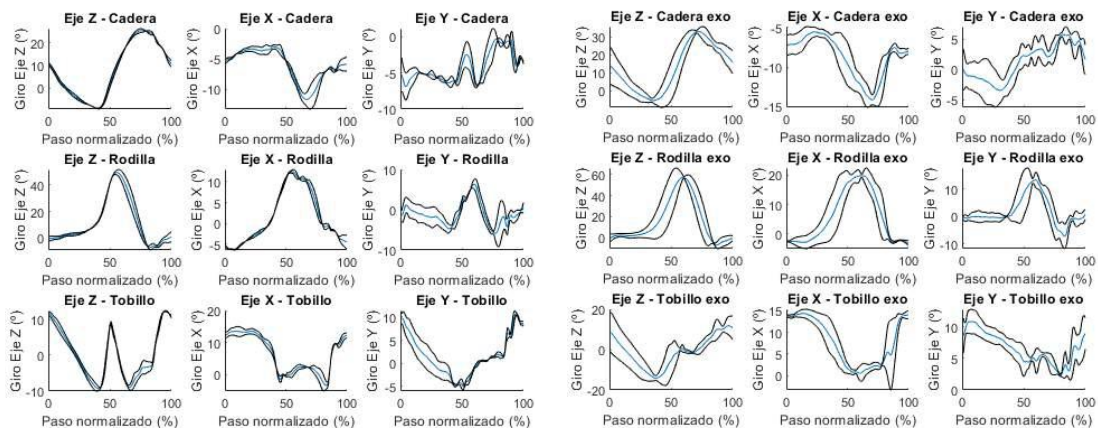


Figura 8. Cinemática articular sin mecanismo (izquierda) y con mecanismo (derecha) durante marcha en superficie inclinada.

4. Discusión y conclusiones

Las gráficas muestran una leve alteración de los patrones cinemáticos entre ambas condiciones en los dos experimentos realizados. El cálculo del valor RMS en el caso de la flexión dorsal-plantar durante la marcha en suelo es de $2,04^\circ$, y en la inversión-eversión durante la marcha en plano inclinado es de $2,60^\circ$. No obstante siguen existiendo diferencias notables en los datos presentados, lo que está relacionado tanto con alteraciones debidas a la compatibilidad cinemática, como a las condiciones experimentales. En relación a esto último, la utilización de sensores inerciales tiene, al menos, las siguientes fuentes de error: influencia de interferencias electromagnéticas, los procedimientos de calibración anatómicos, influencia de movimientos relativos entre el IMU y los segmentos corporales. En cualquier caso, el uso de un dispositivo externo, aunque proporcione total libertad de movimientos a la articulación, sigue imponiendo una perturbación a la marcha de la persona.

5. Referencias

[1] H. Mardomingo-Medialdea, P. Fernández-González, and F. Molina-Rueda, "Usabilidad y

- aceptabilidad de los exoesqueletos portables para el entrenamiento de la marcha en sujetos con lesión medular: Revisión sistemática,” *Rev. Neurol.*, vol. 66, no. 2, pp. 35–44, 2018.
- [2] A. Esquenazi, M. Talaty, and A. Jayaraman, “Powered Exoskeletons for Walking Assistance in Persons with Central Nervous System Injuries: A Narrative Review,” *PMR*, vol. 9, no. 1, pp. 46–62, Jan. 2017.
- [3] G. Carpino, A. Pezzola, M. Urbano, and E. Guglielmelli, “Assessing Effectiveness and Costs in Robot-Mediated Lower Limbs Rehabilitation: A Meta-Analysis and State of the Art,” *J. Healthc. Eng.*, vol. Article ID, pp. 1–9, 2018.
- [4] E. Y. Y. Cheung, T. K. W. Ng, K. K. K. Yu, R. L. C. Kwan, and G. L. Y. Cheing, “Robot-Assisted Training for People With Spinal Cord Injury: A Meta-Analysis,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 98, no. 11, pp. 2320–2331.e12, 2017.
- [5] V. Lajeunesse, C. Vincent, F. Routhier, E. Careau, and F. Michaud, “Exoskeletons’ design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury,” *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 11, no. 7, pp. 535–547, 2016.