

Generación de Trayectorias Articulares para una Plataforma de Rehabilitación de la Fractura de Tobillo

M. Zamora, A. Rodríguez-Liñan, G. Quiroz-Compean, B. Cotri-Melece
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Ave. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., CP 66455 México.
Email: zamm1880643@uanl.edu.mx

Abstract— With the recent progress in care robots, the interest in the automatization of rehabilitation therapies has been increasing due to the benefits of personalized rehabilitation and the ease of performing rehabilitation without the need to leave home or have an expert throughout the entire process. Therefore, the present article proposes a methodology capable of generating the desired trajectories needed to conduct a proper ankle rehabilitation after suffering a fracture.

Palabras clave—fractura de tobillo, generación de trayectorias, rehabilitación.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a con la OMS una lesión se define como *el daño físico que se produce cuando un cuerpo humano se somete bruscamente a algún tipo de energía mecánica, térmica, química o radiada*. Dependiendo de la lesión, el individuo se ve afectado en diferentes aspectos como la incapacidad de usar alguna de sus extremidades, la pérdida total o parcial de su autonomía, entre otras. Acorde con la guía de práctica clínica contenida en el Catálogo Maestro de Guías de Práctica Clínica del Instituto Mexicano del Seguro Social [1], la fractura de tobillo está asociado al 75% al 85% de la fractura de tibia junto con peroné. Por otro lado, la fractura de tobillo está entre el 12% al 15% de incidencia en lesiones deportivas [2]. La fractura de tobillo es un padecimiento de gran importancia en las salas de urgencias a nivel global, en países como Reino Unido o Estados Unidos, representa hasta el 10% de las visitas al servicio de urgencias [3]. Para poder realizar el proceso de recuperación, el paciente debe de someterse a un entrenamiento con ejercicios repetitivos de forma pasiva y activa, los cuales se realizan con la ayuda del personal de asistencia médica, estimulando las zonas afectadas con la finalidad de recuperar la movilidad y la fuerza.

Este tipo de proceso puede conllevar una cantidad considerable de tiempo y esfuerzo, tanto de parte del paciente como del personal de asistencia médica. La realización de los ejercicios es llevada a cabo de manera manual, por lo que la repetibilidad y el cumplimiento de las metas de rehabilitación, tales como el rango y la velocidad de la movilidad o la cantidad de repeticiones, poseen una cuantificabilidad limitada, derivado de la complejidad de

obtener una medición exacta del movimiento. Dado lo anterior, se ha investigado el diseño y uso de dispositivos de asistencia que permitan automatizar la rehabilitación articular. En [4] se presenta un prototipo basado en la cinemática inversa de la articulación del tobillo, el cual tiene la capacidad de medir la fuerza con la que el paciente interactúa con el prototipo, sin embargo se ve limitado por el rango de movimientos permitidos y su estructura de gran tamaño. En [5] se presenta un simulador de la rehabilitación del tobillo en los tres planos anatómicos utilizando un controlador PID para el seguimiento de las trayectorias.

Existen además dispositivos de asistencia tales como exoesqueletos [6], el cual es utilizado para la rehabilitación de la caminata, sin embargo solo cuenta con una articulación de tobillo permitiendo solo la rotación en el plano sagital. La efectividad de la automatización de las terapias de rehabilitación ha sido discutida ampliamente en trabajos como [7], donde se propone el uso de una serie de ejercicios los cuales son denominados "neurorehabilitación" en los cuales incluyen el uso de órtesis y exoesqueletos para rehabilitación de la caminata, sin embargo, para la obtención de estos resultados es necesario tomar en cuenta la capacidad del paciente para la realización de los ejercicios propuestos, esta técnica denominada asistencia según sea necesario, *AAN* por su acrónimo en inglés [8], la cual permite al usuario realizar los movimientos en la medida de lo posible mientras que el dispositivo de asistencia empleado le brinda la asistencia necesaria para realización de la terapia. Los ejercicios que deben realizarse para la rehabilitación de tobillo varían dependiendo de la lesión y de las recomendaciones del fisioterapeuta, por lo que se necesita una metodología que permita convertir estos ejercicios en trayectorias numéricas que puedan ser emuladas por la plataforma de rehabilitación. A lo largo del presente trabajo se presenta una planeación de trayectorias articulares para la rehabilitación del tobillo.

II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta cubre las lesiones de tobillo derivadas de una fractura, excluyendo el caso de la lesión conocida como "pie caído", puesto que requiere de un proceso específico para su rehabilitación. Para poder

proponer trayectorias que se adecuen al proceso de rehabilitación y cumplan con los requerimientos establecidos por los fisioterapeutas, se han analizado ejercicios comúnmente usados en rehabilitación de tobillo. El proceso para llevar a cabo esta rehabilitación, consiste en una valoración inicial por un fisioterapeuta, detectando las anomalías en la movilidad de la articulación dañada. Una vez identificadas las deficiencias en los rangos de movilidad o molestias al realizar movimientos, se seleccionan los ejercicios, tanto pasivos como activos, necesarios para llevar a cabo la rehabilitación, con el objetivo de recuperar la fuerza y el rango de movimiento en la articulación afectada.

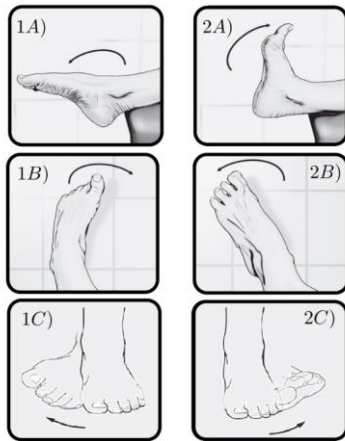


Fig. 1. Algunos ejemplos de los ejercicios utilizados para la rehabilitación del tobillo, en A) se indican movimientos de arriba a abajo, B) apoyando el talón en el suelo hacer rotaciones hacia dentro y hacia afuera, C) girar el pie de izquierda a derecha [9].

Tomando en cuenta los ejemplos de los ejercicios realizados para la rehabilitación de tobillo, como se muestra en la figura 1 y los rangos óptimos de movimiento del tobillo que se muestran en la tabla I; es posible conocer algunos de los puntos por los que esta deberá pasar para lograr completar la trayectoria descrita por el ejercicio de rehabilitación. A las trayectorias creadas mediante estos puntos se les llama de referencia, las cuales son construidas utilizando técnicas de interpolación.

Tabla I

Movimientos del tobillo y pie, componentes y rangos aproximados (grados) de cada uno [10] [11] [12].

Movimiento	Eje de referencia anatómico	ROM (grados)	Plano
Flexión dorsal/ Flexión plantar	Eje lateral medial, ubicado mediante los maléolos (centros)	15° - 20°/ 45° - 55°	Sagital
Abducción/ Aducción	Eje vertical	30° - 45°/ 30° - 45°	Transversal
Inversión/ Eversión	Eje anterior-posterior	30° - 35°/ 15° - 20°	Frontal

Con la información que la tabla 1 proporciona, en conjunto con los ejercicios propuestos en la fig. 1, se observa que los movimientos a realizarse deben ser suaves y continuos, sin exceder los rangos de movilidad. No obstante, se sabe que el proceso de rehabilitación es gradual, por lo que se espera que en las primeras sesiones, el movimiento este acotado a las capacidades fisiológicas del paciente. Las cuales están determinadas por la gravedad de la lesión que este padezca. Dado lo anterior, es necesario realizar los ejercicios de la fig. 1 en diferentes rangos de movilidad progresando a lo largo de las sesiones hasta lograr replicar los rangos óptimos para cada movimiento. Dadas las especificaciones anteriormente descritas, se propone el uso de una función armónica

$$\theta(t) = \frac{|a|}{2} \text{Sen} \left(\frac{2\pi t}{T} + \phi \right) + \frac{a}{2} \quad (1)$$

donde a es la amplitud del rango de movimiento en grados, t es el tiempo, T es el periodo con la cual se realiza el movimiento, ϕ es la fase y el tiempo final t_f de ejecución de la función corresponde a un múltiplo N de las repeticiones ciclos de movimiento, tal que $t_f = NT$. Al generar las referencias para los ejercicios de rehabilitación mediante (1), generan trayectorias independientes para los diferentes movimientos del mismo plano.

Al concluir el proceso de rehabilitación de la articulación, se espera que el paciente haya recuperado la movilidad articular. No obstante es necesario continuar con otra etapa de rehabilitación llamada "reeducación de la marcha", la cual se basa en la rehabilitación de la marcha de manera global y en los tratamientos de rehabilitación de la marcha más específicos que se centran en el equilibrio y la propiocepción, los cuales son esenciales en el proceso. La rehabilitación de marcha son el conjunto de las acciones encaminadas a volver a andar de forma eficiente y con seguridad. La generación de la curva de referencia que describe el tobillo a lo largo del plano sagital durante la realización de la marcha puede ser obtenida utilizando una técnica de interpolación cúbica

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2)$$

donde a_0, a_1, \dots, a_3 son los coeficientes que forman el polinomio de orden cúbico capaz de generar la trayectoria entre cada uno de los puntos guía.

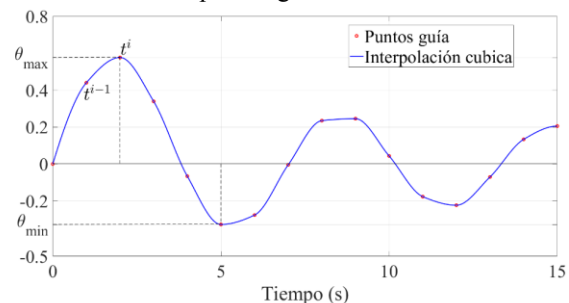


Fig.2. Ejemplo de trayectoria suavizada mediante interpolación cúbica donde se muestra un conjunto de puntos guía unidos formando una curva continua.

En (2) se describe la trayectoria articular deseada, por lo que es posible obtener a través de la diferenciación, tanto la velocidad como la aceleración articular, las cuales son señales de interés, puesto que pueden ser empleadas en algunos algoritmos para la automatización controlada en dispositivos de terapia como órtesis.

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \\ \ddot{\theta} &= 2a_2 + 6a_3t\end{aligned}\quad (3)$$

Si se conocen las velocidades deseadas en los puntos guía, entonces es posible calcular los coeficientes de (2) y (3) como solución única de un conjunto de ecuaciones algebraicas, aunque en algunos casos pueden ser velocidades desconocidas o tener restricciones especiales en cada punto guía, y por lo tanto aplicar otras metodologías. Entonces, suponiendo conocidas las velocidades deseadas en los puntos guía, al evaluar los instantes de tiempo inicial $t=0$ y de tiempo final t_f en (2) y (3) se obtienen las siguientes 4 ecuaciones algebraicas con 4 incógnitas

$$\begin{aligned}\theta(0) &= a_0 = \theta_0 \\ \theta(t_f) &= a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 = \theta_f \\ \dot{\theta}(0) &= a_1 = \dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta}(t_f) &= a_1 + 2a_2t_f + 3a_3t_f^2 = \dot{\theta}_f\end{aligned}\quad (4)$$

al resolver el conjunto de 4 ecuaciones simultáneas para cada coeficiente a_i se obtiene como resultado

$$\begin{aligned}a_0 &= \theta_0 & a_1 &= \dot{\theta}_0 \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f}\dot{\theta}_0 - \frac{1}{t_f}\dot{\theta}_f \\ a_3 &= \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{\theta}_f - \dot{\theta}_0)\end{aligned}\quad (5)$$

Con la evaluación de (5) en los valores deseados de posición y velocidad para cada par consecutivo de puntos guía, se logra la construcción de las trayectorias (2) y (3) que interpolan cada par consecutivo de puntos guías a lo largo de toda la trayectoria discreta de referencia de la marcha humana. Finalmente, se plantea el uso de simulaciones computacionales para la validación de éstas, dichos resultados se encuentran descritos en la siguiente sección.

III. RESULTADOS

Para la validación de la metodología se utilizaron simulaciones numéricas, las cuales fueron llevadas a cabo utilizando el software Matlab®. Para ello se propone realizar los ejercicios de la fig. 1 y las trayectorias descritas por (1) en sesiones, las cuales están divididas por movimiento. Se propone que cada movimiento se repita $N = 10$ veces, con un periodo $T = 4$ segundos y una amplitud inicial $a = 5^\circ$, la cual incrementará de manera gradual cada sesión, hasta llegar al rango óptimo de movimiento, la fase ϕ cambiará según el movimiento y con una duración $t_f = NT = 40$. La fase cambia en función del movimiento a realizar, en el caso de movimientos de flexión

dorsal, eversión y abducción $\phi = -\frac{\pi}{2}$ y $\phi = +\frac{\pi}{2}$ para flexión plantar, inversión y aducción. Finalmente, cuando los rangos óptimos de movimiento sean alcanzados, se continuará con la reeducación de la marcha, por lo que será necesario la generación de trayectorias mediante (2).

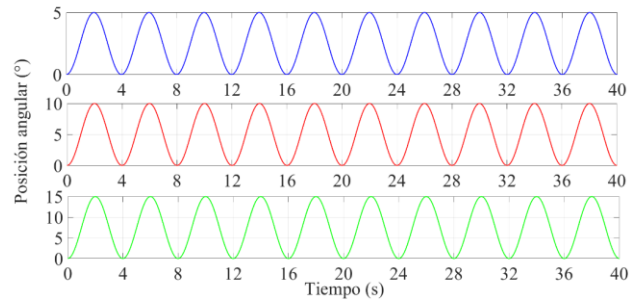


Fig.3. Trayectorias generadas mediante la función armónica propuesta (2). La línea azul cuenta con una amplitud inicial de 5° , la línea roja representa una segunda sesión con una amplitud de 10° , la línea verde cuenta con una amplitud de 15° , indicando que el paciente se encuentra en la tercera sesión de ejercicios.

En la fig. 3 se aprecian las trayectorias angulares propuestas para el movimiento de flexión dorsal, iniciando a una amplitud de $a = 5^\circ$ para la primera sesión de ejercicios, para este caso se propone realizar $N=10$ repeticiones con este rango inicial, posteriormente en una segunda sesión, aumentar el rango de amplitud $a = 10^\circ$, donde nuevamente se realizan $N=10$ repeticiones, finalmente se muestra una nueva sesión donde $a = 15^\circ$, y $N=10$ repeticiones. Así de manera sucesiva, hasta lograr alcanzar el rango óptimo de movimiento para la flexión dorsal. De manera similar, para el movimiento de flexión plantar se proponen las trayectorias correspondientes a la fig. 4, donde el proceso de rehabilitación se encuentra distribuido en varias sesiones de $N=10$ repeticiones cada una, incrementando gradualmente la amplitud del movimiento hasta lograr alcanzar el óptimo.

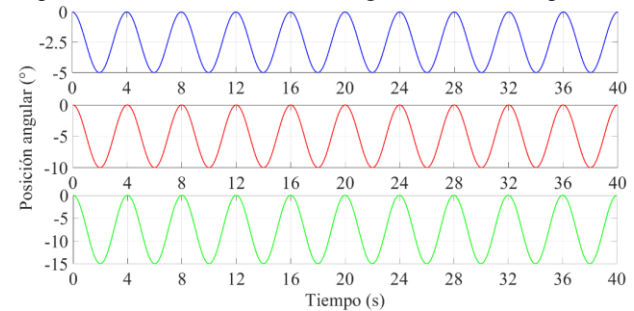


Fig. 4: Trayectorias generadas mediante la función armónica propuesta (2). La línea azul cuenta con una amplitud inicial de -5° , la línea roja representa una segunda sesión con una amplitud de -10° , la línea verde cuenta con una amplitud de -15° , indicando que el paciente se encuentra en la tercera sesión de ejercicios.

En el caso de los ejercicios de abducción / aducción e inversión / eversión, el proceso de rehabilitación propuesto es similar. Cada movimiento deberá ser realizado en sesiones individuales iniciando con una amplitud de $a = 5^\circ$ hasta llegar a los valores óptimos de cada uno de ellos, las referencias que se muestran en las figuras 3 y 4 son empleadas nuevamente, con la particularidad de que los

ángulos se miden con respecto al plano anatómico correspondiente con el movimiento a realizar.

Una vez habiendo recuperado la movilidad en la articulación del tobillo, es necesario la reeducación de la marcha, para ello se propone la una trayectoria que describe el movimiento del tobillo a lo largo del plano sagital; es decir, movimientos de flexión dorsal y flexión plantar mientras se realiza la marcha.

Los puntos guía seleccionados para la realización de la trayectoria que se muestra en la fig. 5, corresponden a datos obtenidos luego de realizar un estudio de la cinemática descrita por el tobillo a lo largo del plano sagital, donde el tobillo inicia en una posición neutral con el intervalo de contacto de talón hasta el apoyo medio. Después se realiza el movimiento del apoyo medio hasta el despegue del pie donde pasa de dorsiflexión a plantarflexión, estas dos etapas corresponden a la fase de apoyo. Después de esto, sigue el movimiento en la fase de balanceo donde el tobillo mantiene una posición casi neutral, con la que concluye el ciclo.

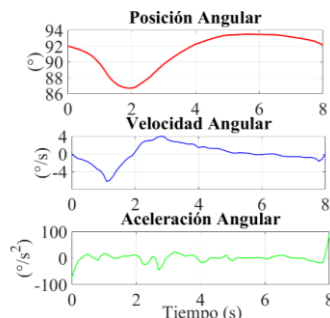


Fig.5. Trayectorias generadas mediante el método de interpolación cúbica (2). La línea negra cuenta representa la posición angular, la línea morada representa la velocidad angular y la línea verde la aceleración angular del tobillo en el plano sagital durante el ciclo de marcha.

IV. DISCUSIÓN

La creación de trayectorias para la rehabilitación articular, particularmente hablando del tobillo, permiten llevar a cabo la automatización de esta terapia; con lo cual se pretende facilitar el acceso a ellas, ya que muchas de las personas que requieren este tipo de rehabilitación no lo llevan a cabo, principalmente por cuestiones asociadas a la falta de tiempo o capacidad de trasladarse a las instalaciones correspondientes para realizar el proceso. La metodología descrita provee una solución viable para los ejercicios de rehabilitación, como parte de los trabajos a futuro queda el proponer y crear trayectorias personalizadas para cada paciente, puesto que sus necesidades son diferentes. Además de la implementación de una plataforma que tenga las características suficientes para poder implementar los ejercicios de rehabilitación en ella.

V. CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se presentan trayectorias que describen tanto los movimientos de los ejercicios

necesarios para la rehabilitación del tobillo y la reeducación de la marcha, dichas trayectorias deben cumplir con especificaciones tales como la cobertura de los rangos óptimos de movimiento y ser llevados a cabo de manera suave y continua. Por lo que la metodología aquí descrita provee una solución matemática que permite la repetibilidad de los movimientos sugeridos a lo largo de la sesión de rehabilitación y en posteriores sesiones; con la facilidad de incrementar de manera precisa y gradual la amplitud del rango de movimiento articular hasta lograr una correcta rehabilitación de la articulación. Como segunda parte de la propuesta, la metodología proporciona una herramienta que permite construir la referencia de la posición angular del tobillo en el plano sagital durante el patrón de la marcha, además de la posibilidad de adquirir información como la velocidad y la aceleración. En ambos casos, tanto en los ejercicios como en la trayectoria de la marcha, la metodología entrega resultados numéricos que permiten su implementación en dispositivos de rehabilitación tales como órtesis o exoesqueletos, con la finalidad de lograr una rehabilitación personalizada y automatizada.

REFERENCIAS

- [1] Tratamiento de la fractura de tobillo en el adulto, IMSS., México., 2010, pp 1-51.
- [2] L. García-Valadez, S. Guzmán-Espinosa, and E. Montelongo-Mercado, "Epidemiología de las fracturas en el servicio de urgencias del hospital central militar," *Revista de Sanidad Militar*, 67(4):147–151, 2013.
- [3] J. Sous Sánchez. "Estudio epidemiológico de las fracturas de tobillo causadas por accidentes deportivos en la isla de Gran Canaria durante el periodo 1995-2005". PhD thesis, departamento de ciencias médicas y quirúrgicas, ULPGC, España, 2010.
- [4] G. Liu., J. Gao., H. Yue., X. Zhang., and G. Lu. (2006) Design and kinematic simulation of parallel robots for ankle rehabilitation. ICMA pages 1109–1113. IEEE. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4026240>.
- [5] A. Blanco Ortega, H.R. Azcaray Rivera, L.G. Vela Valdés, and R.F. Vázquez Bautista. (2011) Prototipo virtual de un rehabilitador de tobillo. CIINDET pages 23–25. Available: https://www.academia.edu/16504516/Prototipo_virtual_de_un_rehabilitador_de_tobillo.
- [6] H. Kawamoto, T.Hayashi, T. Sakurai, K. Eguchi, and Y. Sankai. (2009) Development of single leg version of hal for hemiplegia. EMBC pages 5038–5043. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5333698>.
- [7] A. Donati, R. Shokur, S. Morya, D. S Campos, R. Muioli, C. Gitti, et al. "Long-term training with a brain-machine interface-based gait protocol induces partial neurological recovery in paraplegic patients". *Scientific reports*, 6(1), 1-16., Aug. 2016, DOI 10.1038/srep30383.
- [8] S.Campbell, C. Diduch, and J. Sensinger. "Autonomous assistance-as-needed control of a lower limb exoskeleton with guaranteed stability". IEEE Access, 8:51168–51178, Feb. 2020. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2973373.
- [9] A. López Pujol, "Ejercicios de pie y tobillo.", 2da ed., Barcelona, España Temis Medical, 2011.
- [10] D. Thompson. "Kinesiology of the musculoskeletal system: Foundations for physical rehabilitation". *Physical Therapy*, 83(4):402, Apr 2003.
- [11] M. Schünke, & G. Schünke, *The human body: an introduction to structure and function* Thieme, 2004.
- [12] J. Hamill, K.M. Knutzen, *Biomechanical basis of human movement*, Lippincott Williams & Wilkins, 2006.