

Desarrollo tecnológico de robots de bajo costo para aplicaciones de rehabilitación del cuerpo humano: prototipo virtual para la extremidad inferior

Miguel Díaz-Rodríguez¹, Walter Ocanto¹ y Gilberto González-Parra².

¹Departamento de Tecnología y Diseño, ULA, Mérida.

²Grupo de Matemática Multidisciplinaria, ULA, Mérida.

Correo electrónico: dmiguel@ula.ve, Telf. 02742402810

RESUMEN Las lesiones de tobillo corresponden al grupo de lesiones traumáticas más frecuentes en actividades deportivas y de la vida diaria. Por ende, la demanda en los centros traumatológicos para rehabilitación del tobillo es amplia. Esta actividad es comúnmente realizada por un fisioterapeuta conjuntamente con el paciente. El terapeuta ejecuta una serie de ejercicios sobre el pie del paciente los cuales requieren de una actividad de trabajo ardua y repetitiva. Por tal motivo, la actividad de rehabilitación se adecua para ser asistida por un sistema robótico. El empleo de un sistema robótico que incluya sensores presenta la ventaja de registrar información de gran interés para evaluar el progreso de recuperación del paciente. El objeto de este trabajo consiste en el desarrollo tecnológico de un robot para asistir la rehabilitación del tobillo lesionado. Se definen las especificaciones de diseño utilizadas para la síntesis del sistema robótico a partir del análisis del rango de movimiento de los ejercicios característicos de rehabilitación de lesiones de tobillo. Se desarrolla un prototipo virtual mediante un programa multipropósito que cubre el rango de movimiento principal del tobillo, a saber: flexión dorsal y flexión plantar. En base a los resultados del desempeño cinemático del robot propuesto se concluye que el prototipo puede ser considerado como una alternativa para efectuar la tarea de rehabilitación del tobillo.

Palabras clave: fisiatras, traumáticas, rehabilitación, fisioterapeutas, robótico, flexión dorsal y plantar.

Introducción

En la actualidad, existe un gran interés en emplear robots para realizar actividades de fisioterapia. Esto principalmente debido a que los ejercicios empleados en la rehabilitación, como por ejemplo la de un tobillo lesionado, son en esencia repetitivos y de posible caracterización. El empleo de robots en la fisioterapia redundaría en aliviar del trabajo intenso y repetitivo al fisiatra. Además, el paciente se ve

beneficiado ya que el dispositivo le permitiría la capacidad de ejecutar los ejercicios de rehabilitación por un tiempo prolongado y en su casa. Más aún, presenta dos ventajas: la primera es la capacidad de registrar información sobre el desempeño del paciente; la segunda radica en que puede ser operado por una interfaz computacional. Esto permite registrar información valiosa sobre el estado de recuperación del paciente. Por otra parte, al ser operado por una interfaz computacional, permite su utilización en un centro de telemedicina que bien pudiera ser desarrollado a través del Satélite Simón Bolívar.

La lesión de tobillo corresponde al grupo de lesiones traumáticas más frecuentes en actividades deportivas y de la vida diaria. Su rehabilitación implica las siguientes etapas: 1) inmovilización del tobillo afectado, 2) ejercicios que abarquen el rango de movimiento del tobillo sin aplicación de carga (ejercicios pasivos) y 3) ejercicios de fortalecimiento del tobillo para prevenir lesiones futuras (ejercicios activos). El trabajo de ejercicios pasivos es realizado por el paciente mediante la intervención del terapeuta. Esta tarea es repetitiva y sustituible por un sistema robótico. Esto ha sido

tomado en cuenta por otros autores que han propuesto dispositivos para la rehabilitación de tobillo. Básicamente, los dispositivos propuestos se basan en la configuración de robots paralelos. Dichos robots consisten de una plataforma móvil unida a una plataforma fija a través de una o varias cadenas cinemáticas. Por lo general, se considera que la plataforma fija forma parte de la bancada unida al suelo y la plataforma móvil se une al pie. El rango de movimientos del tobillo se logra moviendo la plataforma móvil mediante los motores o actuadores de cada cadena cinemática.

Uno de los primeros dispositivos propuestos fue el "Rutgers-Ankle" [1]. Dicho robot presenta una configuración de robot paralelo tipo plataforma Stewart. El robot consiste de una plataforma móvil con posibilidad de cambiar su posición y orientación en el espacio. El robot presenta 6 grados de libertad (6-GDL) que le permiten mover al tobillo dentro del rango de movimiento realizados por el fisiatra en los ejercicios de rehabilitación. En un posterior estudio [2] se observa que no es necesario diseñar robots con 6 GDL para este tipo de rehabilitación. En dicho trabajo se propusieron configuraciones de robot paralelos de 3 GDL y 4 GDL. Seguidamente, en [3] destacan que el rango de movimiento puede variar en función del paciente por lo que proponen un dispositivo reconfigurable con respecto al rango de movimientos de cada paciente. Recientemente, en [4] han discutido aspectos funcionales de configuraciones robóticas considerando el modelo cinemático del tobillo. En el trabajo, se emplea un modelo biomecánico del tobillo. Los autores proponen incluir la junta de tobillo como dos pares de revolución formando parte de la topología del robot paralelo. Por lo que el modelo de tobillo es incluido en el estudio cinemático del dispositivo propuesto.

Los modelos hasta aquí propuestos consideran la base fija colocada en el piso y la base móvil unida al pie. Recientemente, se han propuesto configuraciones de robot paralelos del tipo exoesqueleto de 3 GDL [5] y 4 GDL [6]. En estos casos, la plataforma móvil va unida al pie mientras que la plataforma fija va unida a la extremidad inferior. Por último, a partir del estudio de las configuraciones singulares presentes en los robots paralelos, se han propuesto configuraciones de robot paralelos

redundantes [7] y se han estudiado aspectos relacionados con el control del robot [8].

El trabajo consiste en el diseño conceptual de un robot paralelo para asistir en la rehabilitación de un tobillo lesionado. Se considerará para el diseño del robot paralelo los movimientos típicos de rehabilitación de tobillo: 1) flexión plantar y flexión dorsal y 2) inversión y eversión [9]. Se desarrolla un prototipo virtual mediante un programa multipropósito.

Metodología

En primera instancia se identifican las necesidades a partir de estudiar la anatomía del tobillo y de los dispositivos actuales desarrollados para la rehabilitación del tobillo.

Identificación de necesidades

La cinemática del tobillo humano permite los movimientos de flexión dorsal y plantar, abduction/adduction e inversión/eversión. Generalmente, el modelo de la articulación de tobillo puede ser simplificado considerándola como un par esférico de 3-GDL, ver figura 1. En el modelo se supone que los ejes de rotación para estos tres movimientos son coincidentes en un único punto en el tobillo.

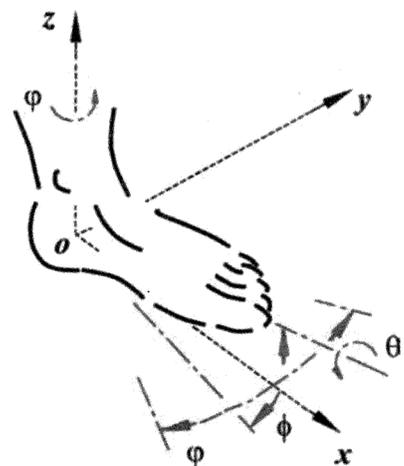
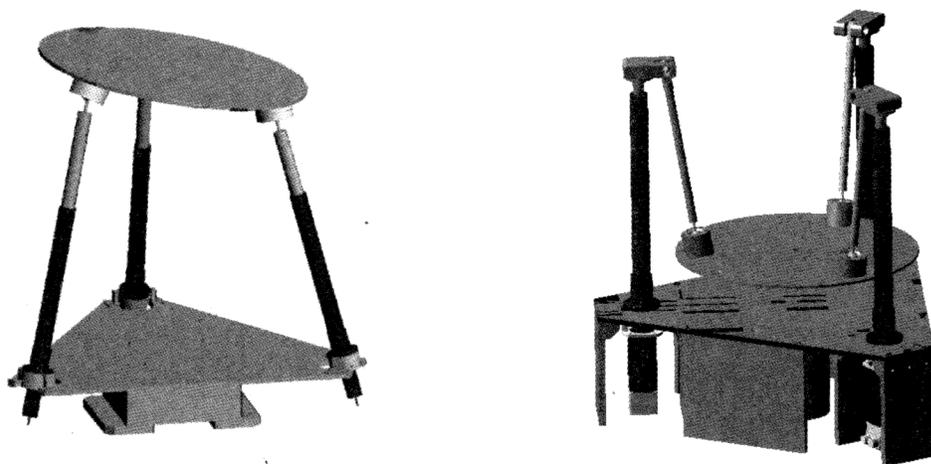


Figura 1. Movimientos de rotación presentes en el tobillo

Del estudio del movimiento del pie se determinan las especificaciones de diseño. En este documento, se emplea un modelo que considera solo dos GDL de rotación. Se considera que el robot

Tabla 1. Rango de movimiento y par límite en un tobillo humano [10]

Movimiento	Par Limite	Rango de Movimiento (grados)
Flexión Dorsal/ Flexión Plantar	40,7-97.6 N m 20,3-36.6 N m	20° 40°
Inversión/ Eversión	max 48 N m max 34 N m	35° 25°

Figura 2. Robots paralelos de 3-GDL lado izquierdo 3-RPS, lado derecho 3-PRS

debe inducir dos tipos de movimiento: 1) flexión plantar y dorsal, y 2) inversión/eversión.

Especificaciones de diseño

Se establecen las especificaciones de diseño tales como: caracterizar el espacio de movimiento utilizados para la rehabilitación del tobillo. Se determinan las fuerzas y pares que pueden ser aplicados al tobillo sin causar lesión. Los límites de espacio de trabajo y par de tobillo humano se indican en la Tabla I.

Alternativas de diseño

Se generan diversas alternativas de diseño basadas en configuraciones de robot paralelo. Un robot paralelo consiste de una plataforma móvil unida a una plataforma fija mediante varias cadenas cinemáticas. Se emplea la configuración de robots paralelo debido a las ventajas comparativas tamaño/rigidez que tiene este tipo de robot con respecto a su contraparte de robot seriales. Se consideraron principalmente dos alternativas que producen 2-GDL de rotación y 1GDL de traslación, los GDL de rotación inducirán flexión plantar y dorsal

y eversión/inversión. Para la traslación se considera que la altura de la plataforma pueda variar con el objeto de que se adecue a la posición del paciente. La figura 2 muestra dos de las alternativas de diseño consideradas: robot paralelo de configuración 3-RPS lado izquierdo y 3-PRS lado derecho de la figura. Las letras P indica una junta prismática, R junta de revolución y S una junta esférica. La letra

Análisis y selección de alternativa

Luego de comparar las alternativas planteadas se seleccionó la configuración 3-PRS. Primero por que esta configuración permite obtener un robot más compacto y de menores dimensiones que el 3-RPS. Lo anterior se debe a que su espacio de trabajo está por encima de los actuadores mientras que en el PRS su espacio de trabajo está contenido en el triangulo equilátero formado por los actuadores. Además, en la configuración PRS se tiene que los motores pueden ser instalados en la base del motor evitando de esta manera que surjan efectos giroscópicos. Por otro lado, en la configuración 3-RPS tiene como aspecto negativo que

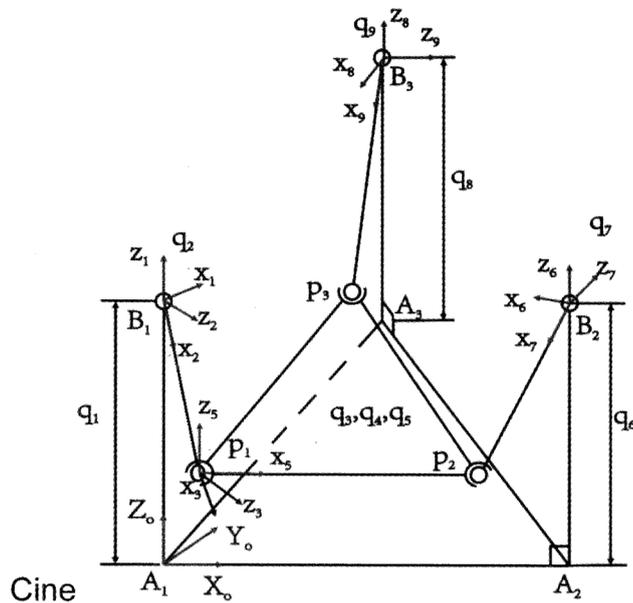


Figura 3. Robots 3-PRS y localización de los sistemas coordenados

Tabla 2. Parámetros Denavit-Hartenbert para el robot 3-PRS

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d_i	q_1	0	0	0	0	q_6	0	q_8	0
a_i	0	0	l_a	0	0	0	0	0	0
θ_i	$\pi/6$	q_2	q_3	q_4	q_5	$5\pi/2$	q_7	$-\pi/2$	q_9
α_i	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$	$\pi/2$	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$

si la actuación es mediante un tornillo de bolas, dicho tornillo se encontraría a su vez girando respecto al par de revolución. Esto no ocurre en la configuración seleccionada.

Cinemática del robot paralelo 3-PRS

Cinemática directa

La cinemática directa de un robot 3-PRS consiste en dado el movimiento lineal en los actuadores

determinar los ángulos roll (γ) y pitch (β) así como el movimiento vertical del centro (z) de la plataforma. Para el modelo cinemático del robots se emplea la notación de Denavit-Hartenbert (D-H). LA figura 3 muestra la localización de los sistemas coordenados empleados para desarrollar el modelo cinemático. Los parámetros D-H se listan en la Tabla 2.

Se aplica el método geométrico bajo la hipótesis de cuerpo rígido por lo que la longitud entre los puntos p_i y p_j se mantiene constante.

$$\mathbf{f}_1(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_6, \mathbf{q}_7) = \left\| \left(\vec{\mathbf{r}}_{A_1B_1} + \vec{\mathbf{r}}_{B_1p_1} \right) - \left(\vec{\mathbf{r}}_{A_1A_2} + \vec{\mathbf{r}}_{A_2B_2} + \vec{\mathbf{r}}_{B_2p_2} \right) \right\| - \mathbf{l}_m = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_2(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_8, \mathbf{q}_9) = \left\| \left(\vec{\mathbf{r}}_{A_1B_1} + \vec{\mathbf{r}}_{B_1p_1} \right) - \left(\vec{\mathbf{r}}_{A_1A_3} + \vec{\mathbf{r}}_{A_3B_3} + \vec{\mathbf{r}}_{B_3p_3} \right) \right\| - \mathbf{l}_m = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_3(\mathbf{q}_6, \mathbf{q}_7, \mathbf{q}_8, \mathbf{q}_9) = \left\| \left(\vec{\mathbf{r}}_{A_1A_3} + \vec{\mathbf{r}}_{A_3B_3} + \vec{\mathbf{r}}_{B_3p_3} \right) - \left(\vec{\mathbf{r}}_{A_1A_2} + \vec{\mathbf{r}}_{A_2B_2} + \vec{\mathbf{r}}_{B_2p_2} \right) \right\| - \mathbf{l}_m = 0 \quad (3)$$

El sistema formado por las ecuaciones (1)-(3) es uno no lineal. Para su solución se emplea el método de Newton-Rhapson. El procedimiento es iterativo y se puede resumir como,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_7 \\ \mathbf{q}_9 \end{bmatrix}^{i+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_7 \\ \mathbf{q}_9 \end{bmatrix}^i - \mathbf{J}_i^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_7) \\ \mathbf{f}_2(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_9) \\ \mathbf{f}_3(\mathbf{q}_7, \mathbf{q}_9) \end{bmatrix} \quad (4)$$

En la ecuación, i indica que las variables son evaluadas en la iteración i , \mathbf{J} es la matriz jacobiana de las funciones \mathbf{f}_i con respecto a las variables $[\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_7, \mathbf{q}_9]$. El proceso iterativo finaliza cuando,

$$\sqrt{(\mathbf{f}_1(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_7))^2 + (\mathbf{f}_2(\mathbf{q}_2, \mathbf{q}_9))^2 + (\mathbf{f}_3(\mathbf{q}_7, \mathbf{q}_9))^2} < \varepsilon \quad (5)$$

La localización de la plataforma queda definida empleando un sistema coordenado local unido a la junta esférica p_1 . Una vez obtenidas las coordenadas generalizadas de las piernas del robot se pueden obtener las coordenadas de los puntos p_i . A partir de los tres puntos que definen la ubicación del par esférico se puede construir la matriz de rotación que define el movimiento instantáneo de rotación entre la plataforma móvil y la base.

Cinemática inversa

La cinemática inversa consiste en dado el ángulo de volteo (γ), cabeceo (β) u el desplazamiento en el eje (z), determinar el movimiento lineal requerido en los actuadores. Utilizando un sistema fijo X-Y-Z la matriz de rotación viene definida por,

$${}^o\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_\alpha \mathbf{c}_\beta & \mathbf{c}_\alpha \mathbf{s}_\beta \mathbf{s}_\gamma - \mathbf{s}_\alpha \mathbf{c}_\gamma & \mathbf{c}_\alpha \mathbf{s}_\beta \mathbf{c}_\gamma - \mathbf{s}_\alpha \mathbf{s}_\gamma \\ \mathbf{s}_\alpha \mathbf{c}_\beta & \mathbf{s}_\alpha \mathbf{s}_\beta \mathbf{s}_\gamma - \mathbf{c}_\alpha \mathbf{c}_\gamma & \mathbf{s}_\alpha \mathbf{s}_\beta \mathbf{c}_\gamma - \mathbf{c}_\alpha \mathbf{s}_\gamma \\ -\mathbf{s}_\beta & \mathbf{c}_\beta \mathbf{s}_\gamma & \mathbf{c}_\beta \mathbf{c}_\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

En la ecuación anterior, c_* y s_* se refieren a $\cos(*)$ and $\sin(*)$ respectivamente. Dado γ y β el ángulo α se determina,

$$\alpha = \text{atan2}(s_\beta s_\gamma, (c_\gamma + c_\beta)) \quad (7)$$

Luego de determinar el ángulo α , los restantes términos de la matriz de rotación (6) pueden ser determinados. La posición de los actuadores se determina mediante el siguiente conjunto de ecuaciones,

$$q_1 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + 2h(p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z) - 2gp_x - 2ghu_x + g^2 + h^2 \quad (8)$$

$$q_6 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - h(p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z) + \sqrt{3}h(p_x v_x + p_y v_y + p_z v_z) + g(p_x - \sqrt{3}p_y) + gh(u_x - \sqrt{3}u_y)/2 + gh(v_x - \sqrt{3}v_y)/2 + g^2 + h^2 \quad (9)$$

$$q_8 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - h(p_x u_x + p_y u_y + p_z u_z) - \sqrt{3}h(p_x v_x + p_y v_y + p_z v_z) + g(p_x - \sqrt{3}p_y) - gh(u_x - \sqrt{3}u_y)/2 + gh(v_x - \sqrt{3}v_y)/2 + g^2 + h^2 \quad (10)$$

En la ecuación, $h = l_m / \sqrt{3}$, $g = l_b / \sqrt{3}$, $p_x = -hu_y$, $p_y = -h(u_x - v_y)$, $p_z = z$ y l_b la longitud entre $A_i A_j$.

Resultados

Se estudió el espacio de trabajo obtenido a partir de la variación de los parámetros cinemáticos: l_p , l_b y l_m . Se obtuvo una configuración con un mayor espacio de trabajo para $l_p = 0.540$ m, $l_b = 0.6654$ m y $l_m = 0.5162$ m. La figura 4 muestra el modelo desarrollado en un programa multipropósito. En la figura, se ha simulado la articulación de tobillo como una serie de barras conectadas mediante pares de revolución. La figura 5 muestra el ángulo de giro de la plataforma móvil. Como puede apreciarse, para la trayectoria de prueba se obtuvo un movimiento sinusoidal, similar al ejercido por un terapeuta. El rango de movimiento está entre 102 y 77, es decir, la plataforma puede rotar 30° por lo que está dentro del rango de movimiento de la articulación de tobillo.

Conclusión

En el trabajo se presentó un estudio preliminar con miras al desarrollo tecnológico de un robot para asistir la rehabilitación del tobillo lesionado. Se definieron las especificaciones de diseño utilizadas para la síntesis del sistema robótico a partir del

análisis del rango de movimiento de los ejercicios característicos de rehabilitación de lesiones de tobillo. Se desarrolló un prototipo virtual preliminar y se modeló el comportamiento cinemático mediante un programa multipropósito. Se concluye que el prototipo puede ser considerado como una alternativa para efectuar la tarea de rehabilitación del tobillo.

Referencias

- A. C. Satici, A Erdogan y V. Patoglu. Design of a Reconfigurable Ankle Rehabilitation Robot and its Use for the Estimation of the ankle Impedance. Proceedings of IEEE Rehabilitation Robotics, Japan, 2009.
- A. Hernández. El movimiento del Cuerpo Humano: Estructura del Movimiento aplicado a la actividad física. Universidad de los Andes Consejo de Estudios de Postgrado, ISBN: 980-11-0770-7, Venezuela, 2004.
- C. E Syrseloudis y I. Z. Emiris. A Parallel Robot for Ankle Rehabilitation-Evalutaion and its Design Specificaction. Proceedings of IEEE Bio-Informatics & BioEngineering, Grecia 2008.

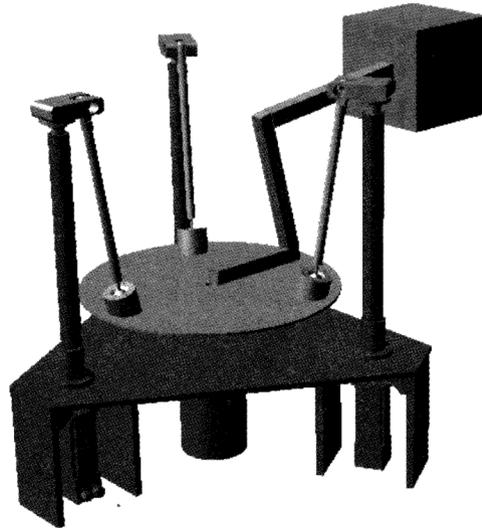
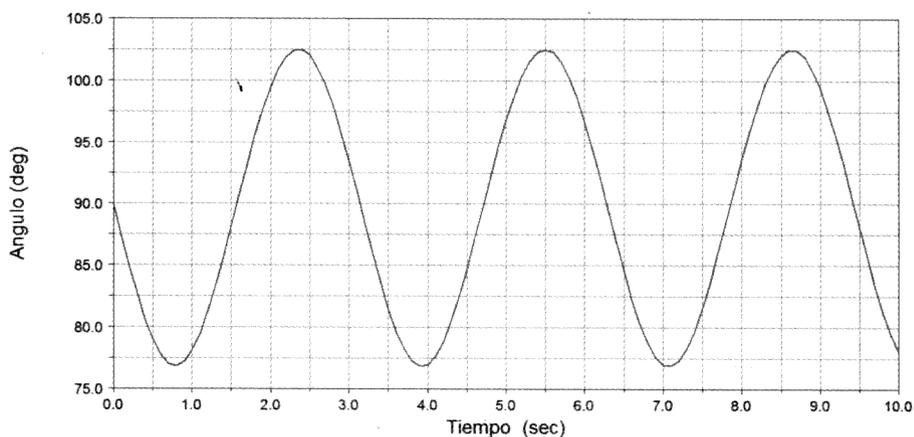


Figura 4. Prototipo virtual del robot y del pie



J. Dai, T. Zhao y C. Nester. Sprained Ankle. Physiotherapy Based Mechanism Synthesis and Stiffness Analysis of a Robotic Rehabilitation Device. *Autonomous Robots*, vol. 16, pp. 207-218, 2004.

M. Girone, G. Burdea, M. Bouzit y V. Popescu. A Stewart Platform-Based System for Ankle Telerehabilitation. *Autonomous Robots*, vol. 10, pp. 203-212, 2001.

Y. Fan y Y. Yin. Mechanism Design and Motion Control of a Parallel Ankle Joint for Rehabilitation Robotic Exoskeleton. *Proceedings of IEEE Robotics and Biomimetics*, China, 2009.

Y. H. Tsoi, S. Q. Xie. Y. A. E. Graham. Design, Modeling and Control of an Ankle Rehabilitation Robot. En *Libro: Design and Control of Intelligent Robotic Systems*. Pp. 377-399. Springer-Verlag Berlin, 2009.

Y. H. Tsoi y S. Q. Xie. Design and control of a parallel robot for ankle rehabilitation. *Int. Journal Intelligent Systems Technologies and Application*, vol. 8, num. 2-4, pp: 100-113, 2010.

J. Yoon, J. Ryu y K. B. Lim. Reconfigurable Ankle Rehabilitation Robot for Various Exercises. *Journal of Robotic System*. vol. 11. Pp. S15-S33, 2006.