

Entrenamiento y Rehabilitación de la Marcha en Pacientes Pediátricos a través de la Plataforma Robótica CPWalker

Cristina Bayón¹

¹Grupo de Ingeniería Neural y Cognitiva, Centro de Automática y Robótica, CAR-CSIC, cristina.bayon@csic.es

Sergio Lerma Lara², Óscar Ramírez¹, José Ignacio Serrano¹, María Dolores del Castillo¹, Juan Manuel Belda-Lois³, Ignacio Martínez² y Eduardo Rocon¹

²Hospital Infantil Universitario Niño Jesús

³Instituto de Biomecánica de Valencia

Resumen

La Parálisis Cerebral (PC) está relacionada con un trastorno de la postura y el movimiento debido a una lesión ocasionada en el cerebro cuando éste no se ha desarrollado completamente. Al ser una de las discapacidades más prevalentes a edades tempranas, la investigación y el desarrollo de dispositivos robóticos para la rehabilitación de la marcha en estos pacientes ha incrementado en los últimos tiempos. Sin embargo, los dispositivos actuales están enfocados sólo en controlar trayectorias de movimiento, olvidando el control postural del usuario y la adaptación de la terapia a las necesidades específicas de cada paciente. Este documento presenta los resultados preliminares de la aplicación de una nueva plataforma robótica (CPWalker) en la rehabilitación de la marcha de niños con diplejía espástica, durante una validación de cinco semanas. CPWalker está formado por un andador inteligente con sistema de control de peso y locomoción autónoma y un exoesqueleto robótico que realiza el movimiento guiado de las articulaciones. Además, el dispositivo incluye la posibilidad de mejorar el control postural del paciente durante la marcha, adaptando la terapia a las necesidades demandadas por el usuario.

Palabras Clave: Parálisis Cerebral, Diplejía Espástica, Rehabilitación, Robótica, Marcha, Postura, Exoesqueleto.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores consecuencias de la Parálisis Cerebral (PC) en población infantil es la limitación del movimiento, caracterizada por una reducción de la velocidad y la resistencia de la marcha o una corta amplitud de paso al caminar [1].

En las últimas décadas, la terapia robótica ha venido complementando a las convencionales con el propósito de rehabilitar este trastorno del movimiento y otros similares [2,3]. En la actualidad, existen distintos dispositivos de rehabilitación de la marcha comerciales para niños con PC [4–6]. Sin embargo, aunque la mayoría de ellos (ej. Lokomat [4], GT-1 [6]) incluyen sistemas de soporte parcial de peso (PBWS) y realizan movimiento guiado y repetitivo de las articulaciones, muchos de estos equipos no conciben la mejora del control postural durante la marcha ni permiten realizar la terapia con desplazamiento a través del entorno de rehabilitación en lugar de sobre cinta rodante. Además, los ejercicios llevados a cabo con los dispositivos actuales son similares independientemente del paciente, no siendo posible la adaptación de la terapia a las necesidades específicas de cada usuario.

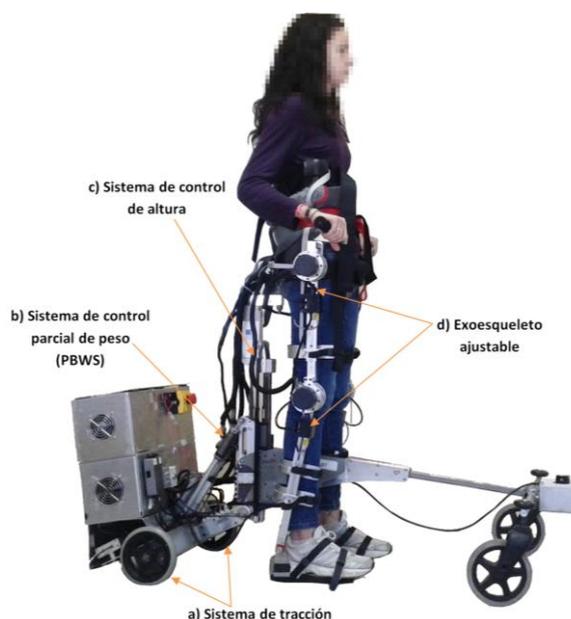


Figura 1. Plataforma robótica CPWalker

El hecho de mantener una postura apropiada durante la marcha es un aspecto de gran relevancia en niños con PC y limitaciones similares [7,8]. Del mismo modo, las grandes diferencias tanto físicas como cognitivas dadas entre este tipo de pacientes hacen necesario buscar un ajuste individual del tratamiento robótico para cada usuario. En este sentido surge el prototipo robótico CPWalker [9] (Figura 1), el cual permite implementar nuevas terapias novedosas para la rehabilitación de niños con PC y otras discapacidades relacionadas. El cambio que introduce CPWalker dentro de la robótica de rehabilitación está centrado en tres pilares fundamentales: en primer lugar, la opción de desplazamiento libre (no restringido a cinta rodante) sobre el entorno de rehabilitación, que puede resultar un parámetro muy importante en la motivación de la población tratada; en segundo lugar, la implementación de estrategias de "asistencia según necesidad" en subtarefas específicas de la marcha se cree que optimizará el tratamiento mediante el incremento de la participación activa del paciente; y como tercer punto, la mejora del control postural de cabeza y tronco durante la rehabilitación con terapia robótica se espera que proporcione mejores resultados del tratamiento.

Para llevar a cabo los tres puntos planteados, se hará uso de la plataforma CPWalker (andador inteligente + exoesqueleto), la cual estará controlada por una interfaz para establecer la interacción entre el paciente y la terapia robótica.

2. MÉTODOS

2.1. DISPOSITIVO

La plataforma robótica utilizada en este estudio para ayudar a los usuarios a rehabilitar su marcha es el dispositivo CPWalker (Figura 1), descrito en profundidad en [9,10]. CPWalker lleva incorporados actuadores tanto en el andador inteligente como en el exoesqueleto robótico, con el fin de conseguir una plataforma de rehabilitación robótica activa. Este dispositivo ofrece la posibilidad de implementar novedosas terapias robóticas para el entrenamiento de la marcha en pacientes con PC o similares, lográndose a través de los sistemas mostrados en la Figura 1: a) sistema de tracción, el cual proporciona la traslación del dispositivo y el soporte necesario para el paciente durante el tratamiento ambulatorio; b) sistema PBWS, que es fundamental para mejorar el equilibrio y otras características de la marcha como la simetría entre miembros y la longitud de paso [11,12]; c) sistema de control de altura, el cual es utilizado para adaptar CPWalker a diferentes medidas antropométricas y calibrar el peso descargado al inicio de las sesiones; y d) sistema de exoesqueleto ajustable compuesto por seis

articulaciones que proporcionan el movimiento guiado de las extremidades inferiores del usuario.

2.2. PACIENTES

Tres pacientes pediátricos con diplejía espástica (uno de ellos de sexo femenino) fueron seleccionados para participar en este estudio. Dos de los tres casos presentaban diplejía espástica derivada de PC y en el otro la diplejía provenía de una Paraparesia Espástica Familiar (PEF) tal y como se muestra en la Tabla 1.

El criterio de inclusión de pacientes fue: a) edades comprendidas entre 11 y 18 años; b) peso máximo del paciente 75kg; c) niños que hayan pasado un proceso de Cirugía Ortopédica Multinivel de Único Evento (SEMLS) y se encuentren en período de recuperación; d) niveles de la Gross Motor Function Classification System (GMFCS) entre I y III; e) pacientes capaces de indicar dolor o malestar. Para el criterio de exclusión se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: a) existencia de heridas sin cicatrizar en miembros inferiores del paciente; b) conductas agresivas por parte del usuario; c) grave deterioro cognitivo.

Tabla 1. Descripción de los pacientes

Paciente 1	Discapacidad	PC-Diplejía espástica
	GMFCS	III
	Mes post-quirúrgico	42
	Edad	14
	Peso [kg]	32
Paciente 2	Discapacidad	PC-Diplejía espástica
	GMFCS	II
	Mes post-quirúrgico	11
	Edad	12
	Peso [kg]	40
Paciente 3	Discapacidad	PEF-Diplejía espástica
	GMFCS	-
	Mes post-quirúrgico	4
	Edad	13
	Peso [kg]	43

El ensayo clínico fue llevado a cabo en el Hospital Infantil Universitario Niño Jesús de Madrid. El comité de ética perteneciente a este hospital proporcionó la aprobación para la realización del estudio, garantizando su conformidad con la Declaración de Helsinki. Todos los pacientes y familiares fueron informados con anterioridad y los padres/tutores dieron su consentimiento.

2.3. TERAPIA

La capacidad de mantener niveles altos de motivación en niños con PC durante su rehabilitación, y la posibilidad de aprovechar movimientos residuales del paciente, son considerados factores realmente importantes a la hora de mejorar los efectos de la terapia robótica. Dos puntos claves de CPWalker son: una interfaz para corregir la postura del usuario durante la marcha y un control de impedancia selectivo que permite adaptar los ejercicios a las necesidades del paciente.

En primer lugar, la interacción cognitiva entre el niño y la plataforma CPWalker tendrá lugar a través de una interfaz basada en sensores inerciales (IMUs), Figura 2. La razón fundamental de esta interfaz es dar feedback a los pacientes cuando éstos pierdan el control de la orientación recomendada en cabeza o tronco, al mismo tiempo que estén realizando entrenamiento de la marcha. Dos sensores IMU, colocados en el tronco y la cabeza del paciente respectivamente, son los encargados de medir la orientación de estas partes del cuerpo en cada momento. La información proporcionada por los sensores aporta un gran valor tanto a clínicos como pacientes durante la ejecución de la terapia: permite corregir la marcha agachada del usuario y, como consecuencia, la cadera está más extendida siguiendo esta estrategia [7,8,13]. El procedimiento basado en esta interfaz consiste en dar feedback acústico a través de un sonido molesto a los sujetos, en el momento en que el tronco o la cabeza no permanecen en posición adecuada. La Figura 2 muestra la medición en tiempo real de la cabeza y tronco del Paciente 3 en un instante de la terapia en que se pierde la postura en el plano sagital tanto de cabeza como de tronco (recuadros rojos).

El segundo enfoque ideado para promover la participación del paciente está basado en controlar la interacción física entre el robot y el niño mediante una estrategia de control de impedancia selectiva, la cual es implementada en sub tareas de la marcha seleccionadas previamente [14]. Es importante asegurar que el niño por sí mismo colabore en los ejercicios de rehabilitación y no ofrezca resistencia al movimiento impuesto. Como consecuencia, se ha incluido la filosofía de "asistencia según necesidad" dentro del control del dispositivo.

La combinación de las estrategias propuestas en este apartado, junto con el desplazamiento por el entorno de rehabilitación, promueve la integración moto-sensorial y tiene efecto en la reorganización cerebral del niño [9].

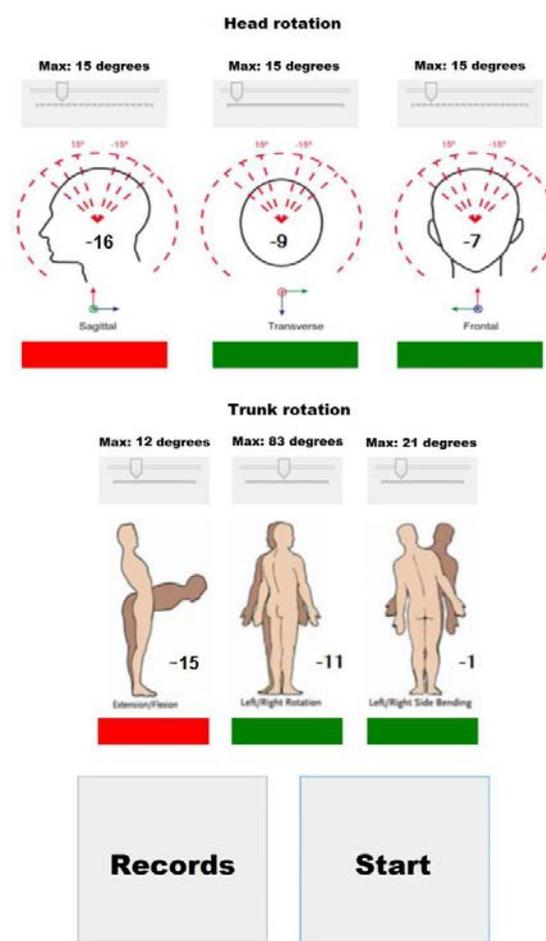


Figura 2. Interfaz de control postural con registro de datos del Paciente 3 en un momento de la terapia.

El entrenamiento con CPWalker fue llevado a cabo durante cinco semanas, dos días por semana (10 sesiones totales), con ejercicios de 60 minutos cada día, incluyendo 10 minutos de preparación del robot. Los ejercicios consistieron en caminar con la plataforma robótica siguiendo recorridos en línea recta dentro de las instalaciones del hospital. El control de impedancia se aplicó a la articulación de cadera con el objetivo de intensificar la colaboración del paciente en el movimiento de flexión-extensión de esta articulación. Dado que los tres niños que participaron utilizaban órtesis de tobillo-pie (AFO), la articulación de tobillo en CPWalker se fijó a 90°. Al no tener los tobillos actuados, la propulsión que los pacientes podían realizar sobre el suelo no era lo suficientemente alta, así que se impuso el control de posición en las articulaciones de rodilla de CPWalker para poder alcanzar una adecuada flexión en esta articulación.

Por otro lado, con el fin de acomodar al usuario y siguiendo recomendaciones por parte del personal clínico, todos los pacientes comenzaron la primera sesión con su peso completamente suspendido (PBWS del 100%), y esta descarga fue bajando

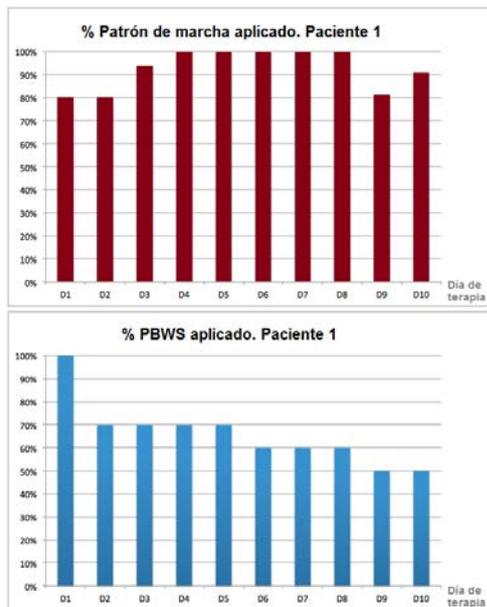


Figura 3. Evolución de los parámetros de la terapia en el Paciente 1. Arriba: porcentaje de patrón de marcha normalizado aplicado durante cada día de terapia; Abajo: porcentaje de descarga de peso del paciente a lo largo de los diez días de entrenamiento.

progresivamente a lo largo de las cinco semanas de estudio (Figura 3). El objetivo de esto fue conseguir que el sujeto se acostumbrase de forma gradual a soportar el peso sobre sus piernas. Del mismo modo, el porcentaje de patrón de marcha normalizado aplicado a cada articulación y la velocidad de ejecución fueron variando durante la terapia, con la finalidad de incrementar la dificultad del ejercicio.

Las terapias se adaptaron de forma individual a cada uno de los tres niños, buscando siempre la intención de intensificar la parte más afectada en cada caso. Concretamente, el tratamiento definido para el Paciente 1 y el Paciente 3 buscó la mejora del control postural del tronco, mientras que con el Paciente 2 el propósito principal fue mejora el movimiento de extensión de cadera.

3. RESULTADOS

Para el análisis de resultados se realizaron tres estudios de la marcha sin el robot a través de un sistema de ocho cámaras infrarrojas (BTS-Bioengineering): uno de ellos antes de comenzar la terapia robótica, el segundo pasada la mitad de las sesiones, y el último justo después de terminar el tratamiento con CPWalker.

Después de cinco semanas de entrenamiento robótico con CPWalker y comparando los estudios pre y post, se concluye que los tres pacientes mejoraron la velocidad media, la cadencia de paso y la longitud de zancada con cada pierna, ver Tabla 2.

Por otro lado, teniendo en cuenta los parámetros cinemáticos de la marcha, los tres sujetos mejoraron las variables seleccionadas para cada una de su terapia adaptada, tal y como muestra la Figura 4 y Tabla 2. Las trayectorias descritas tanto por la pierna derecha como por la izquierda en el estudio post-intervención están más cerca de los valores normales (zona gris) que las trayectorias del estudio pre-intervención (Figura 4). Para los Paciente 1 y 3, tal y como se comentó anteriormente, la terapia estuvo centrada en mejorar el control de tronco durante la marcha. Así, la gráfica mostrada para ambos en la Figura 4, corresponde a la rotación del tronco. En cambio, para el Paciente 2, la misma figura muestra el cambio provocado en movimientos de flexión-extensión y abducción-adducción de cadera.

Como las terapias fueron adaptadas de forma individual a cada uno de los pacientes, los resultados deben ser entendidos como casos de estudio separados.

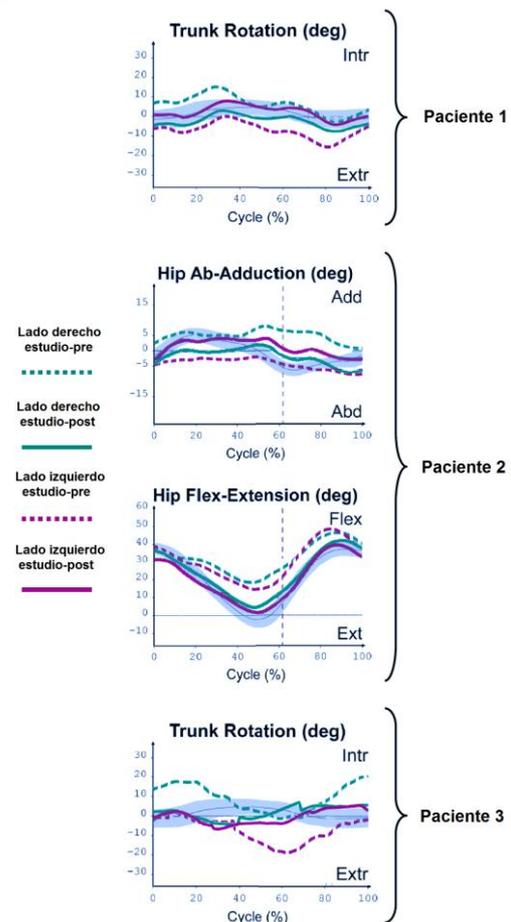


Figura 4. Comparación de resultados de los análisis de marcha pre y post intervención robótica para los Pacientes 1, 2 y 3. Las líneas verdes están referidas al lado derecho y las moradas al lado izquierdo. Líneas continuas corresponden con resultados del estudio post intervención y líneas discontinuas al estudio pre intervención.

Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos en los estudios pre y post intervención para cada paciente. Parámetros espacio-temporales y cinemáticos de la marcha. Correspondencia con Figura 4.

	Parámetro	3D análisis - Pre		3D análisis - Post		Normalidad
		Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda	
Paciente 1	Velocidad media (m/s)	0.40±0		0.40±0		1.20±.20
	Cadencia (pasos/min)	73.80±6.00		75.80±7.97		129.60±8.40
	Longitud de paso (m)	0.30±.01	0.24±.04	0.33±.02	0.27±.01	0.58±.06
Rotación de tronco	% Rango (máx-mín)	286.29%	248.71%	204.84%	233.87%	100%
	Pico máximo	14.83°	0°	4°	10°	4.80°
	Pico mínimo	-2.92°	-15.42°	-8.70°	-4.50°	-2.40°
Paciente 2	Velocidad media (m/s)	0.60±.10		0.80±0		1.20±.20
	Cadencia (pasos/min)	102.20±12.65		120.8±9.38		129.60±8.40
	Longitud de paso (m)	0.31±.03	0.24±.05	0.40±.01	0.38±.02	0.58±.06
Flex-Ext de cadera	% Rango (máx-mín)	70.63%	85.82%	95.19%	96.20%	100%
	Pico máximo	46.40°	48.40°	41.90°	39.50°	37.10°
	Pico mínimo	18.50°	14.50°	4.30°	1.50°	-2.40°
Paciente 3	Velocidad media (m/s)	0.20±0		0.40±0		1.20±.20
	Cadencia (pasos/min)	45±3.70		75±.60		129.60±8.40
	Longitud de paso (m)	0.23±.05	0.30±.05	0.32±.02	0.33±.04	0.58±.06
Rotación de tronco	% Rango (máx-mín)	343.55%	350.48%	224.52%	234.35%	100%
	Pico máximo	20°	2.60°	8.25°	6.28°	4.80°
	Pico mínimo	-1.30°	-19.13°	-5.67°	-8.25°	-2.40°

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Esta contribución ha presentado una plataforma robótica novedosa para la rehabilitación de la marcha en pacientes con diplegia espástica, así como sus resultados previos procedentes de una validación con tres sujetos pediátricos. El punto clave de la plataforma CPWalker es la capacidad de realizar un entrenamiento de la marcha con desplazamiento por el entorno, al mismo tiempo que el dispositivo proporciona feedback al usuario con el fin de corregir su postura mientras camina. Estas funciones son complementadas con una adaptación de la terapia a cada paciente enfocándose en ensalzar los puntos más débiles en cada caso.

A pesar de que los resultados obtenidos son prometedores, esta investigación cuenta con algunas limitaciones como son: el reducido tamaño de la población (tres pacientes), el corto tiempo de intervención (sólo 10 sesiones) y el seguimiento sólo a corto plazo. Se necesitan más estudios para determinar si las mejoras conseguidas tienen una

duración a largo plazo y éstas afectan positivamente a los pacientes con PC y discapacidades similares.

Como trabajo futuro, actualmente se está evaluando la efectividad de un método no invasivo para promover más la participación del sistema nervioso central dentro de la estrategia de rehabilitación. Para conseguir esto, se utilizan sensores electroencefalográficos ubicados en el cuero cabelludo del sujeto como parte principal de una interfaz multimodal. Ello permite controlar el inicio de la marcha robótica permitiendo la implementación del enfoque "top-down" [15].

Agradecimientos

El trabajo presentado en este documento ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad español, a través del contrato DPI2012-39133-C03-01.

Los autores quieren agradecer a la empresa Made for Movement su aporte a la base del proyecto con el dispositivo pasivo NF-Walker. Del mismo modo,

agradecen el esfuerzo y la contribución de todos los pacientes y sus familiares.

Referencias

- [1] Pirpiris M, Wilkinson AJ, Rodda J, Nguyen TC, Baker RJ, Nattrass GR, et al. Walking speed in children and young adults with neuromuscular disease: comparison between two assessment methods. *J Pediatr Orthop* 2003;23:302–7.
- [2] Fasoli SE, Ladenheim B, Mast J, Krebs HI. New horizons for robot-assisted therapy in pediatrics. *Am J Phys Med Rehabil* 2012;91:S280–9. doi:10.1097/PHM.0b013e31826bcff4.
- [3] Bayón C, Raya R, Lara SL, Ramírez Ó, J IS, Rocon E. Robotic Therapies for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review. *Transl Biomed* 2016;7:1–10.
- [4] Borggraefe I, Kiwull L, Schaefer JS, Koerte I, Blaschek A, Meyer-Heim A, et al. Sustainability of motor performance after robotic-assisted treadmill therapy in children: an open, non-randomized baseline-treatment study. *Eur J Phys Rehabil Med* 2010;46:125–31.
- [5] Verazaluce-Rodríguez PR, Rodríguez-Martínez P, Neri-Gómez S, Hernández-Aquino RM. Evolución de la marcha en pacientes con parálisis cerebral y desplazamiento asistido, mediante su entrenamiento con equipo de asistencia robótica. *Rehabilitación* 2014;48:3–8. doi:10.1016/j.rh.2013.04.006.
- [6] Smania N, Bonetti P, Gandolfi M, Cosentino A, Waldner A, Hesse S, et al. Improved gait after repetitive locomotor training in children with cerebral palsy. *Am J Phys Med Rehabil* 2011;90:137–49. doi:10.1097/PHM.0b013e318201741e.
- [7] Dewar R, Love S, Johnston LM. Exercise interventions improve postural control in children with cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol* 2014. doi:10.1111/dmcn.12660.
- [8] Abd El-Kafy E, El-Basatini H. Effect of postural balance training on gait parameters in children with cerebral palsy. *Am J Phys Med Rehabil* 2014;93:938–47.
- [9] Bayón C, Ramírez O, del Castillo MD, Serrano JI, Raya R, Belda-Lois JM, et al. CPWalker: Robotic Platform for Gait Rehabilitation in Patients with Cerebral Palsy. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2016. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [10] Bayón C, Rocon E, Raya R, Ramírez O, del Castillo MD, Serrano JI, et al. CP-Walker: plataforma robótica para la rehabilitación de la marcha en niños con Parálisis Cerebral. *DRT4all*, 2015.
- [11] Willoughby K, Dodd K, Shields N. A systematic review of the effectiveness of treadmill training for children with cerebral palsy. *Disabil Rehabil* 2009.
- [12] Damiano DL, DeJong SL. A systematic review of the effectiveness of treadmill training and body weight support in pediatric rehabilitation. *J Neurol Phys Ther* 2009;33:27–44. doi:10.1097/NPT.0b013e31819800e2.
- [13] Robert MT, Guberek R, Sveistrup H, Levin MF. Motor learning in children with hemiplegic cerebral palsy and the role of sensation in short-term motor training of goal-directed reaching. *Dev Med Child Neurol* 2013;55:1121–8. doi:10.1111/dmcn.12219.
- [14] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation: parts I, II and III. *J Dyn Syst Meas Control* 1985;107.
- [15] Gallego JÁ, Ibanez J, Dideriksen JL, Serrano JI, del Castillo MD, Farina D, et al. A Multimodal Human–Robot Interface to Drive a Neuroprosthesis for Tremor Management. *IEEE Trans Syst Man, Cybern Part C (Applications Rev)* 2012;42:1159–68. doi:10.1109/TSMCC.2012.2200101.