

# ACTAS

DE LAS

## XXXVIII Jornadas de Automática

Gijón · Palacio de Congresos · 6, 7 y 8 de Septiembre de 2017



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*



**CEA**  
Comité Español  
de Automática

Colabora

**Gijón**

Convention Bureau



Actas de

**XXXVIII**

**Jornadas de Automática**

© 2017 Universidad de Oviedo  
© Los autores

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo  
Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias)  
Tel. 985 10 95 03 Fax 985 10 95 07  
[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)  
[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo y soporte, sin la preceptiva autorización.

## Prefacio

Las *Jornadas de Automática* se celebran desde hace **40 años** en una universidad nacional facilitando el encuentro entre expertos en esta área en un foro que permite la puesta en común de las nuevas ideas y proyectos en desarrollo. Al mismo tiempo, propician la siempre necesaria colaboración entre investigadores del ámbito de la Ingeniería de Control y Automática, así como de campos afines, a la hora de abordar complejos proyectos de investigación multidisciplinares.

En esta ocasión, las Jornadas estarán organizadas por la Universidad de Oviedo y se han celebrado del 6 al 8 de septiembre de 2017 en el Palacio de Congresos de Gijón, colaborando tanto la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI) como el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y de Sistemas del que depende el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Además de las habituales actividades científicas y culturales, esta edición es muy especial al celebrarse el **50 aniversario de la creación de CEA**, Comité Español de Automática. Igualmente este año se conmemora el 60 aniversario de la Federación Internacional del Control Automático de la que depende CEA. Así se ha llevado a cabo la presentación del libro que se ha realizado bajo la coordinación de D. Sebastián Dormido, sobre la historia de la Automática en España en una sesión en la que han participado todos los ex-presidentes de CEA conjuntamente con el actual, D. Joseba Quevedo.

Igualmente hemos contado con la presencia de conferenciantes de prestigio para las sesiones plenarias, comunicaciones y ponencias orales en las reuniones de los 9 grupos temáticos, contribuciones en formato póster. Se ha celebrado también el concurso de CEABOT, así como una nueva Competición de Drones, con el ánimo de involucrar a más estudiantes de últimos cursos de Grado/Máster.

En el marco de las actividades culturales programadas se ha podido efectuar un recorrido en el casco antiguo situado en torno al Cerro de Santa Catalina y visitar la Laboral.

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López  
Presidente del Comité Organizador



## Program Committee

Antonio Agudo	Institut de Robòtica i Informàtica Industrial
Rosa M Aguilar	University of La Laguna.
Luciano Alonso	University of Cantabria
Ignacio Álvarez García	Universidad de Oviedo
Antonio Javier Artuñedo García	Centre for Automation and Robotics (CSIC-UPM)
José M. Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Pedro Balaguer	Universitat Jaume I
Antonio Javier Barragán Piña	Universidad de Huelva
Alfonso Baños	Universidad de Murcia
Guillermo Bejarano	University of Seville
Gerardo Beruvides	Centro de Automática y Robótica
Carlos Bordons	University of Seville
Jose Manuel Bravo	University of Huelva
Jose Luis Calvo-Rolle	University of A Coruña
Fernando Castaño Romero	Centro de Automática y Robótica (UPM -CSIC)
José Luis Casteleiro-Roca	University of Coruña
Alvaro Castro-Gonzalez	Universidad Carlos III de Madrid
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Abel A. Cuadrado	University of Oviedo
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
Emma Delgado	Universidad de Vigo
Jose-Luis Diez	Universitat Politecnica de Valencia
Manuel Domínguez	Universidad de León
Juan Manuel Escaño	Universidad de Sevilla
Mario Francisco	University of Salamanca
Maria Jesus Fuente	Universidad de Valladolid
Juan Garrido	Universtiy of Cordoba
Antonio Giménez	Universidad de Almeria
Evelio Gonzalez	Universidad de La Laguna
José-Luis Guzmán	Universidad de Almería
Rodolfo Haber	Center for Automation and Robotics (UPM-CSIC)
César Ernesto Hernández	Universidad de Almería
Eloy Irigoyen	UPV/EHU
Agustin Jimenez	Universidad PolitÁcnica de Madrid
Emilio Jiménez	University of La Rioja
Jesus Lozano	Universidad de Extremadura
Jorge Luis Madrid	Centro de Automática y Robótica
Luis Magdalena	Universidad Politécnic de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
Miguel Ángel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

## Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia  
Beltrán de La Cita, Jorge  
Bermudez-Cameo, Jesus  
Blanco-Claraco, Jose-Luis  
Blanes, Francisco  
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar  
Gimenez, Antonio  
Gruber, Patrick  
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro  
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul  
Marín Plaza, Pablo  
Mañanas, Miguel Angel  
Morales, Rafael  
Moreno, Francisco-Angel

Nuñez, Luis Ramón

Ponz Vila, Aurelio  
Posadas-Yague, Juan-Luis  
Poza-Luján, Jose-Luis  
Pumarola, Albert

Raya, Rafael  
Revestido Herrero, Elías  
Rocon, Eduardo  
Ruiz Sarmiento, José Raúl  
Ruiz, Adria

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor



## Table of Contents

<b>Ingeniería de Control</b>	
TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS .....	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES .....	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim .....	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C .....	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos .....	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES .....	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel .....	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero .....	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0 .....	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobiorreactor raceway .....	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos .....	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3 .....	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarréño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> <b>Automar</b> <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

Exploración y Reconstrucción 3D de Fondos Marinos Mediante AUVs y Sensores Acústicos .....	218
<i>Oscar L. Manrique Garcia, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL .....	226
<i>Marina Pérez de La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro, Rafael Morales Herrera and Eva Segura</i>	
MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS .....	232
<i>Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Peñalver, David Fornas and Diego Centelles</i>	
<hr/> <b>Bioingeniería</b> <hr/>	
MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA .....	238
<i>Eliana Aguilar, Oscar Andres Vivas and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar .....	244
<i>Cristina Bayón, Teresa Martín-Lorenzo, Beatriz Moral-Saiz, Óscar Ramírez, Álvaro Pérez-Somarriba, Sergio Lerma-Lara, Ignacio Martínez and Eduardo Rocon</i>	
PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA .....	251
<i>Arturo Bertomeu-Motos, Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Luis Daniel Lledó, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS.....	256
<i>Carlos Castedo Hernández, Rafael Estop Remacha, Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos Del Blanco</i>	
Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements.....	264
<i>Alejandro Clemotte, Miguel A. Velasco and Eduardo Rocon</i>	
Diseño de un sensor óptico de fuerza para exoesqueletos de mano.....	270
<i>Jorge Diez Pomares, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalan Orts, Francisco Javier Badesa Clemente, José María Sabater and Nicolas Garcia Aracil</i>	
POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG .....	276
<i>Josep Dinarès-Ferran, Christoph Guger and Jordi Solé-Casals</i>	
EFFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI.....	282
<i>Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Arturo Bertomeu-Motos, Luisa Lorente, Nuria Requena, Irene Delegido, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive.....	288
<i>Andres Hidalgo Romero and Eduardo Rocon</i>	

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG) .....	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial .....	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL .....	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA .....	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG .....	328
<i>Marisol Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES .....	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches .....	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN .....	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/>	
<b>Control Inteligente</b>	
<hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico .....	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias .....	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote. ....	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors . . . .	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluze, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO.....	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.....	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.....	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> <b>Educación en Automática</b> <hr/>	
REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL.....	445
<i>Ignacio Díaz Blanco, Alvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Alvarez and Hilario López García</i>	
Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos .....	451
<i>Juan M. Gandarias, Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA .....	457
<i>Julio Garrido Campos, David Santos Esterán, Juan Sáez López and José Ignacio Armesto Quiroga</i>	
Construcción y modelado de un prototipo fan & plate para prácticas de control automático	465
<i>Cristina Lampon, Javier Martin, Ramon Costa-Castelló and Muppaneni Lokesh Chowdary</i>	

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D .....	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES .....	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC .....	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruíz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL .....	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA. ....	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim .....	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN .....	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte .....	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks .....	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO .....	563
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez and Cesar De Prada</i>	
A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios .....	569
<i>Miquel Àngel Piera Eroles, Julia de Homdedeu, Maria Del Mar Tous, Thimjo Koca and Marko Radanovic</i>	
ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK .....	575
<i>José Luis Pitarch, Marc Kalliski, Carlos Gómez Palacín, Christian Jasch and Cesar De Prada</i>	
Predicción de la irradiancia a partir de datos de satélite mediante deep learning .....	582
<i>Javier Pérez, Jorge Segarra-Tamarit, Hector Beltran, Carlos Ariño, José Carlos Alfonso Gil, Aleks Attanasio and Emilio Pérez</i>	
MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA .....	589
<i>Gabriel Pérez Rodríguez and Fernando Morilla</i>	
Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos	596
<i>Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha</i>	
DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO .....	604
<i>Pedro Santos, Jose Luis Pitarch and César de Prada</i>	
DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS .....	611
<i>Jorge Segarra-Tamarit, Emilio Pérez, Hector Beltran, Enrique Belenguer and José Luis Gandía</i>	
Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras .....	618
<i>Alejandro Tapia Córdoba, Pablo Millán Gata, Fabio Gómez-Estern Aguilar, Carmelina Ierardi and Álvaro Rodríguez Del Nozal</i>	
FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS .....	626
<i>J.M Torres, R.M. Aguilar, C.A. Martin and S. Diaz</i>	
SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACION AUTONOMA .....	633
<i>José Emilio Traver, Juan Francisco Ortega Morán, Ines Tejado, J. Blas Pagador, Fei Sun, Raquel Pérez-Aloe, Blas M. Vinagre and F. Miguel Sánchez Margallo</i>	
PLANIFICACION DE LA PRODUCCION BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES .....	641
<i>Manuel Jesús Vasallo Vázquez, José Manuel Bravo Caro, Emilian Cojocarú and Manuel Emilio Gegundez Arias</i>	
Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía .....	649
<i>Ascensión Zafra Cabeza, Rafael Espinosa, Miguel Àngel Ridao Carlini and Carlos Bordóns Alba</i>	
Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab .....	657
<i>Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya, Àlvaro Castro-Gonzalez, Juan José Gamboa, Marcos Maroto Gómez, Sara Marqués Villaroya, Antonio J. Pérez Vidal and Miguel Àngel Salichs</i>	

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO .....	664
<i>Marta Ayats and Raul Suarez</i>	
COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS .....	672
<i>Brayan Bermudez, Kristel Novoa and Miguel Valbuena</i>	
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS .....	680
<i>Andrea Blanco Ivorra, Jorge Diez Pomares, David Lopez Perez, Francisco Javier Badesa Clemente, Miguel Ignacio Sanchez and Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo .....	686
<i>Raúl Cebolla Arroyo, Jorge De Leon Rivas and Antonio Barrientos</i>	
USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR .....	694
<i>Josep Arnau Claret and Luis Basañez</i>	
Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate .....	701
<i>Jorge De León Rivas and Antonio Barrientos</i>	
SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL .....	709
<i>Mario Domínguez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo and Samuel Marcos Pablos</i>	
Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos .....	717
<i>David Fernández Chaves, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales .....	724
<i>Juan José Gamboa, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo, Marcos Maroto Gómez and Miguel A. Salichs</i>	
Clasificación de información táctil para la detección de personas .....	732
<i>Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-De-Gabriel and Alfonso García-Cerezo</i>	
Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT .....	738
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS .....	746
<i>Daniel González, Lluís Ros and Federico Thomas</i>	
TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS .....	754
<i>Ana Gómez Delgado, Carlos Perez-Del-Pulgar, Antonio Reina Terol and Victor Muñoz Martinez</i>	
CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION .....	760
<i>Juan Hernández Vicén, Santiago Martínez de La Casa Díaz and Carlos Balaguer</i>	
PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO .....	766
<i>Carlos G. Juan, Jose Maria Vicente, Alvaro Garcia and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	

Estimadores de fuerza y movimiento para el control de un robot de rehabilitación de extremidad superior.....	772
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Asier Brull</i>	
Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste .....	780
<i>Marcos Maroto Gómez, José Carlos Castillo, Fernando Alonso-Martín, Juan José Gamboa, Sara Marqués Villarroya and Miguel Ángel Salichs</i>	
Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot .....	787
<i>Sara Marqués Villarroya, Jose Carlos Castillo Montoya, Fernando Alonso Martín, Marcos Maroto Gómez, Juan José Gamboa and Miguel A. Salichs</i>	
<b>HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO .....</b>	<b>793</b>
<i>Hector Montes, Roemi Fernandez, Pablo Gonzalez de Santos and Manuel Armada</i>	
Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos .....	799
<i>Antonio José Muñoz-Ramírez, Jesús Manuel Luque-Bedmar, Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Anthony Mandow, Javier Serón and Alfonso Garcia-Cerezo</i>	
<b>SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS .....</b>	<b>806</b>
<i>Cándido Otero Moreira, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz Dominguez, Joaquín López Fernández, Rafael Barea, Eduardo Romera, Eduardo Molinos, Roberto Arroyo, Luís Miguel Bergasa and Elena López</i>	
Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica.....	814
<i>Francisco Pastor, Juan M. Gandarias and Jesús M. Gómez-De-Gabriel</i>	
<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....</b>	<b>821</b>
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
<b>INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL .....</b>	<b>829</b>
<i>Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio and Antonio Barrientos</i>	
Evolución de la robótica social y nuevas tendencias.....	836
<i>Antonio J. Pérez Vidal, Alvaro Castro-Gonzalez, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya and Miguel A. Salichs</i>	
<b>DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO .....</b>	<b>844</b>
<i>Irene Rivas-Blanco, M Carmen López-Casado, Carlos Pérez-Del-Pulgar, Francisco García-Vacas, Víctor Fernando Muñoz, Enrique Bauzano and Juan Carlos Fraile</i>	
<b>CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....</b>	<b>852</b>
<i>Francisco Abiud Rojas-De-Silva and Raul Suarez</i>	
Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos.....	860
<i>José Raúl Ruiz Sarmiento, Cipriano Galindo and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento .....	868
<i>Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES .....	876
<i>Alejandro Suarez, Guillermo Heredia and Anibal Ollero</i>	
EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS .....	864
<i>David Vargas Frutos, Juan Carlos Ramos Martínez, José Luis Samper Escudero, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre Pérez</i>	

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET....	892
<i>María Luz Alvarez Gutierrez, Isabel Sarachaga Gonzalez, Arantzazu Burgos Fernandez, Nagore Iriondo Urbistazu and Marga Marcos Muñoz</i>	
CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA .....	900
<i>Francisco Blanes Noguera and Andrés Benlloch Faus</i>	
Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta .....	906
<i>Alfons Crespo, Patricia Balbastre, Jose Simo and Javier Coronel</i>	
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES .....	913
<i>Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernandez and Marga Marcos</i>	
DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta .....	921
<i>Hector Perez and J. Javier Gutiérrez</i>	
ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR .....	929
<i>Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yaguë, Giovanni-Javier Tipantuña-Topanta, Francisco Abad and Ramón Mollá</i>	
Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles .....	935
<i>Rafael Priego, Elisabet Estévez, Darío Orive, Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido .....	942
<i>Jose Simo, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë and Francisco Blanes</i>	

---

### Visión por Computador

---

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes .....	948
<i>Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos, Arturo de La Escalera and José María Armingol Moreno</i>	
ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES .....	956
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Sergio Cebollada and Oscar Reinoso</i>	
Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopletismográfica.....	964
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres, Jordan Ortega Rodríguez, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides .....	970
<i>Juan Miguel Garcia Haro and Santiago Martinez de La Casa</i>	

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES .....	976
<i>Natalia García Del Prado, Victor Gonzalez Castro, Enrique Alegre and Eduardo Fidalgo Fernández</i>	
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL .....	983
<i>Manuel Ibarra-Arenado, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla-Gómez and Juan Pérez-Oria</i>	
Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks .....	991
<i>Iván De Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez and Wesam Al Nabki</i>	
Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador ..	999
<i>Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de La Escalera and Jose Maria Armingol</i>	
T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS .....	1007
<i>Tomás Prado, Blanca Quintana, Samuel A. Prieto and Antonio Adan</i>	
EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS .....	1015
<i>Pablo Rubio, Eduardo Fidalgo, Enrique Alegre and Víctor González</i>	
SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS ..	1023
<i>Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Ines Tejado and Blas M. Vinagre</i>	
Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil .....	1031
<i>David Zúñiga-Nöel, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno and Javier González Jiménez</i>	

# Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar

C. Bayón<sup>1</sup>, O. Ramírez<sup>1</sup>, E. Rocon<sup>1</sup>

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

T. Martín-Lorenzo<sup>2</sup>, B. Moral-Saiz<sup>2</sup>, A. Pérez-Somarriba<sup>2</sup>, S. Lerma-Lara<sup>2</sup>, I. Martínez<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Hospital Infantil Universitario Niño Jesús

## Resumen

*El uso de dispositivos robóticos para rehabilitación de la marcha se ha incrementado en los últimos años de manera notable. Sin embargo, hay una falta de estudios que proporcionen pautas detalladas sobre cómo usar la robótica de rehabilitación para obtener los máximos beneficios del tratamiento. Esta contribución presenta un programa de entrenamiento detallado para rehabilitación robótica de la marcha de niños con Parálisis Cerebral (PC). Éste está centrado en la consecución de diferentes especificaciones de la International Classification of Functioning, Disability and Health framework, Children and Youth version (ICF-CY). El programa de entrenamiento se divide en 16 sesiones, en las que los pacientes trabajan control motor, fuerza y potencia en sus extremidades inferiores. Resultados de una validación clínica con 4 pacientes pediátricos muestran mejoras en diferentes aspectos de la marcha, tales como velocidad, fuerza, longitud de paso o desempeño según la Gross Motor Function Measure-88. Este estudio fue registrado públicamente con el número ISRCTN18254257 el 23 de Marzo de 2017.*

**Palabras Clave:** Entrenamiento robótico, Terapia, Parálisis Cerebral, Exoesqueleto, Rehabilitación

## 1 INTRODUCCIÓN

La limitación de la marcha es uno de los mayores problemas sufridos por niños con Parálisis Cerebral (PC) [1]. Ello es consecuencia de un daño producido en el sistema nervioso central (SNC) del paciente, y por tanto, se requiere un entrenamiento funcional óptimo para maximizar las mejoras debidas a la terapia [2], lo que por ende, provocará efectos positivos en la calidad de vida de los pacientes y sus familias [3].

En las últimas décadas, el auge en el desarrollo de exoesqueletos robóticos [4–6], unido a las novedosas estrategias de control para rehabilitación que adaptan la terapia a las necesidades del usuario, ofrece posibilidades prometedoras para intensificar las mejoras debidas al tratamiento robótico [7,8]. Sin embargo, en el caso de población infantil, no existen suficientes evidencias que aseguren que la terapia robótica actual ofrezca mejores resultados por sí misma respecto a la terapia física convencional [9]. Por tanto, son necesarios nuevos enfoques que permitan mejorar la rehabilitación en estos pacientes jóvenes, haciendo de la terapia robótica una clave del cambio.

Una de las mayores limitaciones del uso de la tecnología en la práctica clínica, aparte del elevado coste, es la ausencia de estudios que describan un programa de entrenamiento robótico detallado. La amplia variedad de cambios que pueden ser aplicados a los parámetros de la terapia robótica, dificulta el hecho de especificar los ajustes para llevar a cabo la mejor solución posible. Además, la mayoría de los estudios actuales centran la terapia en las extremidades inferiores exclusivamente, pero teniendo en cuenta que la marcha está influenciada también por la postura superior del cuerpo [10], un programa de entrenamiento adecuado no debería ignorar las funciones de cabeza y tronco durante la marcha.

Esta contribución presenta un detallado programa de entrenamiento de la marcha basado en robots para PC, el cual está basado en la consecución de diferentes especificaciones de la International Classification of Functioning, Disability and Health framework, Children and Youth version (ICF-CY) [11]. Ello contribuirá con respuestas precisas a cómo implementar robótica de rehabilitación siguiendo una guía definida. Finalmente, la terapia propuesta es validada en cuatro pacientes con PC utilizando para ello la plataforma CPWalker [5].

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 DISPOSITIVO DE REHABILITACIÓN

La plataforma robótica CPWalker es un dispositivo de rehabilitación de la marcha compuesto por un exoesqueleto unido a un andador, el cual permite entrenamiento con desplazamiento real [5]. Tiene implementado un sistema de control parcial de peso del paciente (PBWS), y a través de controladores individuales por articulación, proporciona un alto grado de adaptación a las capacidades del usuario.

En concreto, cada articulación del exoesqueleto puede trabajar siguiendo los modos de control representados en la Figura 1, que de menor a mayor colaboración del paciente son: i) control de posición (P); ii) control de alta impedancia (AI); iii) control de media impedancia (MI); iv) control de baja impedancia (BI); y v) control de fuerza (F).

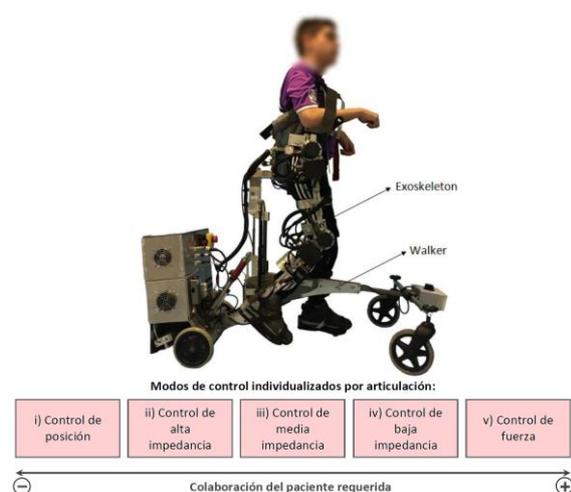


Figura 1. Dispositivo robótico CPWalker (exoesqueleto + andador) y posibles modos de control por articulación

Además del modo de control, el terapeuta puede seleccionar otros parámetros y variables dentro de cada sesión de tratamiento: PBWS, velocidad de marcha y porcentaje de rango de movimiento (ROM). Por otro lado, CPWalker también incluye una estrategia de biofeedback destinada a motivar al paciente para corregir activamente su postura de cabeza y tronco durante la marcha [5,7].

La variedad de modos de control, el número de parámetros ajustables, la facilidad para seleccionar variables de forma individualizada y la posibilidad de implementar diferentes estrategias relacionadas con la marcha en tiempo real, hacen que CPWalker sea una plataforma ideal para validar la propuesta de tratamiento robótico que presenta este manuscrito.

### 2.2 PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO ROBÓTICO

Como se ha comentado en puntos anteriores, la propuesta de entrenamiento robótico está centrada en mejorar las principales funciones de la marcha derivadas de la ICF-CY [11]. Concretamente, los objetivos seleccionados de esta clasificación internacional son: i) movilidad y estabilidad de las articulaciones (b710, b715); ii) potencia muscular (b730); iii) resistencia muscular (b740); iv) control del movimiento voluntario (b760); v) patrón de marcha (b770); vi) conservación de la postura del cuerpo (d415); vii) desempeño de la marcha (d450); viii) funciones propioceptivas (b260); y ix) relaciones personales (d740).

Para alcanzar los objetivos anteriores, los autores realizaron previamente un estudio basado en la National Strength and Conditioning Association (NSCA) youth training guidelines [12], la cual sugiere que ejercicios explosivos de fuerza excéntrica deberían ser el comienzo de un entrenamiento adecuado para asegurar una mayor potencia muscular, con la posterior transferencia de las ganancias a la función de la marcha. De este modo, se determina que los ejercicios del tratamiento propuesto han de ser "multi-articulación", variando su intensidad dependiendo si se trabaja fuerza o potencia: la fuerza llevará asociada ejercicios de una carga alta con velocidad baja, mientras la potencia se trabajará con baja carga pero alta velocidad de movimiento.

De acuerdo con los objetivos de la ICF-CY y cumpliendo con los requisitos de la NSCA, el tratamiento robótico fue conceptualizado en dos *fases*, en las cuales las variables ROM, PBWS y velocidad fueron los principales parámetros bajo variación (Figura 2). Los pacientes entrenaron 2 días no consecutivos por semana, durante un total de 8 semanas (16 sesiones, Figura 2), con el objetivo de cumplir con el número de sesiones necesario para generar cambios neurales significativos [13]. Las sesiones consistieron en un calentamiento previo de 10-15 minutos, seguido de ejercicio de suelo con CPWalker durante 60 minutos, incluyendo finalmente 3 minutos de marcha autónoma como enfriamiento. Una descripción de cada *fase* de 8 sesiones sigue:

i. *Primera fase* (sesión 1 a 8): esta fase trató principalmente de mejorar el control motor, enseñando al paciente la secuencia correcta del movimiento e incrementando la fuerza. Se pidió a los pacientes seguir el movimiento proporcionado por el exoesqueleto con la mínima resistencia posible, empujando el suelo en cada paso e

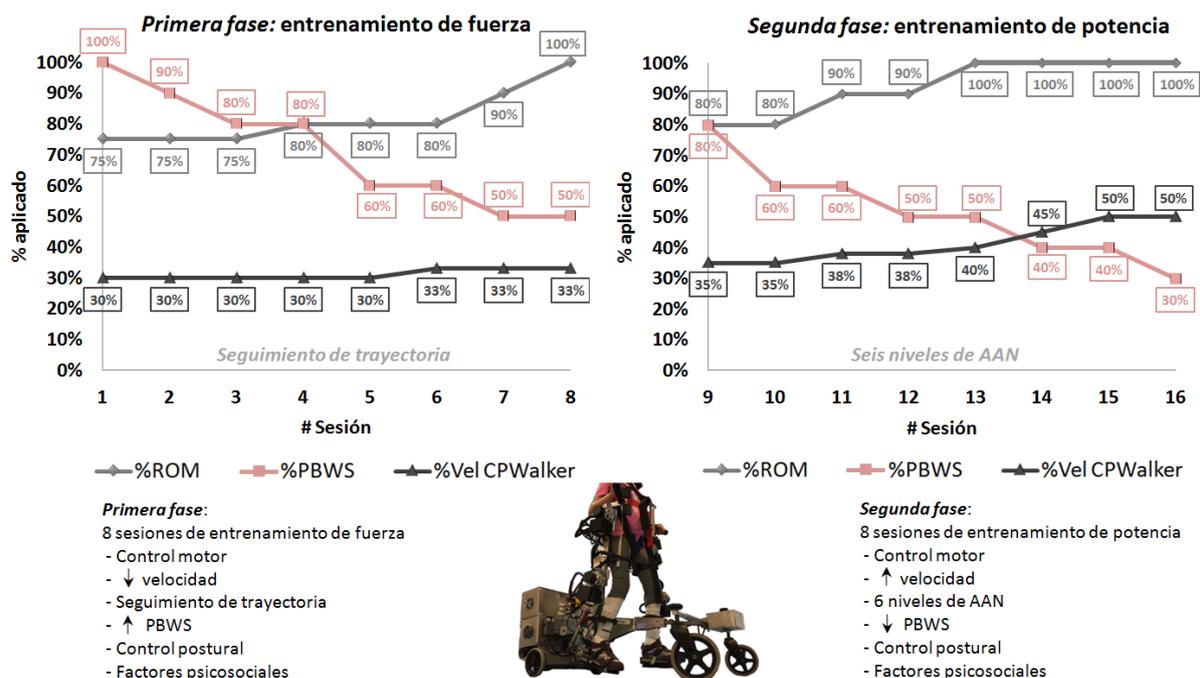


Figura 2. Visión general del programa de entrenamiento robótico. *Primera fase*: sesiones 1 a 8; *Segunda fase*: sesiones 9 a 16. Se hizo una evaluación del progreso de los pacientes antes de comenzar el tratamiento, después de la *primera fase* y al finalizar la *segunda fase*. Las variaciones de velocidad están representadas en porcentajes respecto al total de CPWalker que corresponde con 0.6 m/s.

intentando mantener la máxima flexión y extensión al final de cada ciclo de la marcha. Se dio instrucciones a los niños para hacerles comprender de una mejor forma el patrón de marcha, y durante las sesiones se proporcionó apoyo verbal. Durante toda esta *fase* el modo de control en todas las articulaciones del exoesqueleto fue un control de posición, progresando hacia menor PBWS y mayor ROM a medida que las sesiones eran superadas (Figura 2). El progreso de los parámetros a lo largo de las sesiones fue implementado cuando el personal clínico así lo consideró dependiendo de los niveles de espasticidad, fatiga y control motor presentados en la última sesión realizada. Si el paciente no estaba preparado para saltar al siguiente desafío, la sesión era repetida con los mismos porcentajes anteriores. Se seleccionaron momentos aleatorios de la primera sesión en los que se taparon los ojos del paciente para que éste pudiese sentir la realización del movimiento.

ii. *Segunda fase* (sesión 9 a 16): el objetivo de esta fase fue seguir entrenando el control motor pero ahora incrementando la potencia muscular al mismo tiempo. La contribución del paciente fue muy importante en esta fase para desarrollar neuroplasticidad y preservar la ganancia de control motor obtenida en la *primera fase* [14]. De este modo, se implementaron diferentes niveles de asistencia según necesidad (AAN) relacionados con los distintos modos de control de CPWalker [5] (Tabla 1). El ROM inicial de esta *fase* fue seleccionado al 80%, y alcanzó el 100% en la sesión

13, tiempo en el cual la velocidad fue incrementada (Figura 2). Además, el PBWS de esta fase llegó hasta el 30% del peso total del paciente.

Tabla 1. Niveles de asistencia en cada articulación del exoesqueleto según la fase de tratamiento implementada

	1ª fase		2ª fase				
Nivel	0	1	2	3	4	5	6
Cadera	P	AI	MI	MI	MI	LI	LI
Rodilla	P	P	P	AI	MI	MI	LI

Durante ambas *fases*, la posición de la cabeza y el tronco de los pacientes fueron monitorizadas a través de la estrategia de control postural de CPWalker. Se proporcionó un feedback acústico cada vez que estas posiciones fueron inapropiadas, lo que ayudó a motivar a los niños a mantener una postura correcta durante la marcha rectificando por ellos mismos en caso de ser necesario. Este ejercicio postural permite facilitar el desarrollo de cualquier actividad de la vida diaria, mejora la interacción social del paciente, la participación y la comunicación [10,15].

### 2.3 MÉTRICAS

Con el objetivo de medir de forma objetiva la evolución de los pacientes, y debido a la falta de homogeneidad entre niños con PC, los autores decidieron evaluar la progresión de la terapia

comparando cada paciente consigo mismo en lugar de mantener un grupo de control. Así los análisis y métricas de evaluación representados en la Tabla 2 se llevaron a cabo para cada usuario en tres ocasiones: antes de comenzar el tratamiento (pre), después de 8 sesiones (medio) y al finalizar el conjunto de 16 sesiones (post).

Tabla 2. Métricas de evaluación y momento de aplicación

Métrica	Pre	Medio	Post
Test 10 m (10mwt) [16]	*	*	*
Test 6 min (6mwt) [17]	*	*	*
Análisis 3D de marcha	*	*	*
Medida fuerza isométrica máxima	*	*	*
Evaluación control selectivo extremidades inferiores (SCALE) [18]	*	*	*
GMFM-88, dimensiones D y E [19]	*		*
Kinesiofobia	*		*
Cuestionario evaluación funcional Gillette [20]	*		*
Motivación del paciente	Durante cada una de las sesiones		

## 2.4 PACIENTES

Cuatro pacientes con PC espástica (dos niños, dos niñas, peso  $44.75 \pm 6.29$  kg, altura  $1.56 \pm 0.29$  m y edad  $14.50 \pm 2.38$  años) fueron seleccionados para formar parte del estudio (P1, P2, P3 y P4 en Tabla 3). Los criterios de inclusión para el reclutamiento de pacientes fueron: i) niños entre 11 y 18 años que sufran de diplegia espástica; ii) niveles de la Gross Motor Function Classification System (GMFCS) entre I y IV; iii) peso máximo 75kg; iv) medidas antropométricas de las extremidades inferiores de acuerdo a las limitaciones del exoesqueleto de CPWalker; v) capaces de entender los ejercicios propuestos; y vi) capaces de avisar si surge dolor. Los criterios de exclusión fueron: i) pacientes que hubieran recibido tratamientos concomitantes en un período de 3 meses antes del estudio (ej. cirugía ortopédica o toxina botulínica); ii) niños con deformidades musculoesqueléticas o lesiones superficiales en las extremidades inferiores que puedan ser un problema para el uso del exoesqueleto; iii) pacientes con alteraciones críticas del control

motor como distonía, coreoatetosis o ataxia; iv) comportamientos agresivos; y v) discapacidades cognitivas severas.

El estudio fue llevado a cabo en el Hospital Infantil Universitario Niño Jesús. El Comité de Ética del hospital dio la aprobación del estudio (R-0032/12), garantizando su cumplimiento con la Declaración de Helsinki. Todos los participantes fueron informados y se requirió un consentimiento informado parental antes de comenzar el tratamiento.

Tabla 3. Descripción de los pacientes

Paciente	Género	Edad	GMFCS	Peso (kg)	Altura (m)
P1	Femenino	12	III	40	1.56
P2	Femenino	16	II	42	1.60
P3	Masculino	17	III	54	1.53
P4	Masculino	13	II	43	1.55

## 3 RESULTADOS

Debido a razones no relacionadas con el estudio, tres de los cuatro pacientes (P1, P2 y P4) completaron 15 del total de 16 sesiones. Concretamente, P1 perdió la sesión 8, P2 la sesión 7 y P4 la 11. El resto del tratamiento fue completado de forma exitosa.

Las modificaciones de parámetros propuestas en la Figura 2 fueron completadas sin problemas por todos los pacientes. Sin embargo, cada usuario progresó de forma independiente en cuanto a los niveles de asistencia de la Tabla 1 (ver Figura 3).

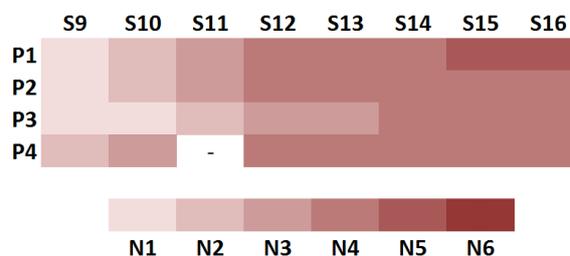


Figura 3. Niveles de asistencia (N1-N6) dependiendo del progreso del paciente en las sesiones de la segunda fase del tratamiento. El paso de un nivel a otro fue dado cuando el paciente alcanzó al menos el 85% del patrón implementado en cada sesión. El nivel para P4 en la sesión 10 no está representado porque este paciente perdió la sesión.

### 3.1 VELOCIDAD DE MARCHA, RESISTENCIA Y RESPUESTAS GLOBALES

Todos los pacientes mejoraron los resultados en las dimensiones D y E de la GMFM-88. La comparación de los estudios pre y post en esta escala, muestra

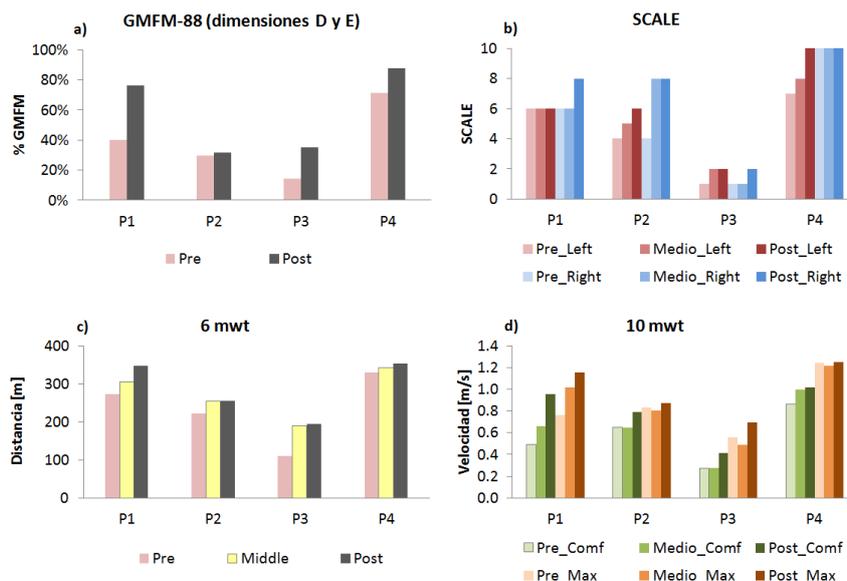


Figura 4. (a) Resultados de la GMFM-88 en dimensiones D y E, (b) SCALE, (c) 6mwt, y (d) 10mwt para los análisis pre, medio y post en los pacientes P1 a P4. La medida de SCALE fue medida bilateralmente (izquierda y derecha). El test de los 10m fue realizado en dos situaciones: velocidad confortable y velocidad máxima.

mejoras del 36.60% para P1, 1.87% para P2, 20.81% para P3 y 16.23% para P4 (Figura 4-a).

La evaluación SCALE también mostró resultados favorables al final del tratamiento robótico (Figura 4-b), donde la mayoría de medidas fueron incrementadas o mantenidas en el nivel máximo de 10 puntos.

Finalmente, tanto la distancia caminada en el 6mwt como la velocidad alcanzada en el 10mwt se incrementaron después del período de rehabilitación (Figura 4-c y d). En el 10mwt se evaluaron dos situaciones: velocidad confortable y velocidad máxima. Las progresiones concretas de cada paciente fueron: P1 (6mwt: 26.92%; 10mwt<sub>comf</sub>: 94.69%; 10mwt<sub>max</sub>: 51.84%); P2 (6mwt: 14.86%; 10mwt<sub>comf</sub>: 21.85%; 10mwt<sub>max</sub>: 5.18%); P3 (6mwt: 75.68%; 10mwt<sub>comf</sub>: 52.21%; 10mwt<sub>max</sub>: 24.60%) and P4 (6mwt: 7.27%; 10mwt<sub>comf</sub>: 18.60%; 10mwt<sub>max</sub>: 0.81%).

### 3.2 PROGRESIÓN DE LA FUERZA

Para cuantificar la fuerza máxima realizada por cada paciente, se tomaron tres medidas con un dinamómetro manual microFET2 (Hoggan Scientific LLC, USA) para diferentes movimientos requeridos: dorsiflexión, flexión plantar, flexión-extensión de rodilla, flexión-extensión de cadera, abducción y adducción. Posteriormente, se realizó la media de las medidas tomadas. Concretamente, las mejoras generales (incluyendo todos los movimientos requeridos) fueron: P1: 129.77±58.71%; P2: 61.39±58.55%; P3: 70.54±83.68% and P4: 34.41±30.41%.

### 3.3 VARIABILIDAD CINEMÁTICA Y ESPACIOTEMPORAL

El análisis cinemático de la marcha en 3D, y en concreto los índices "Gait Profile Score" (GPS) y "Gait Deviation Index" (GDI), dan una visión del acercamiento de la marcha de un paciente respecto a la normalidad. Como puede observarse en la Figura 5, todos los pacientes obtuvieron resultados más cercanos a la normalidad en ambos índices para ambas extremidades (izquierda y derecha), comparando los análisis pre y post.

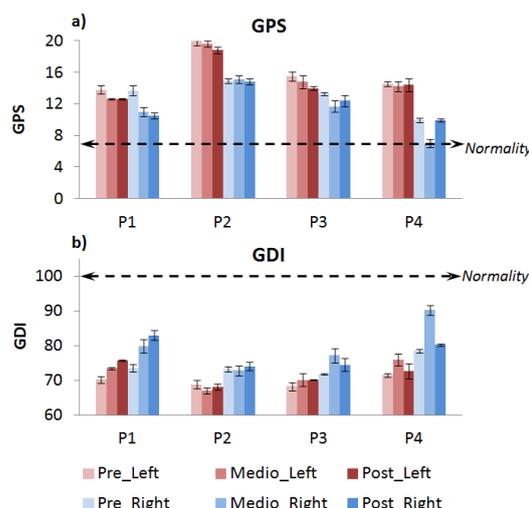


Figura 5. (a) GPS y (b) GDI para los análisis pre, medio y post en los pacientes P1 a P4. Las gráficas muestran la media ± desviación estándar de forma bilateral. La normalidad en GPS (<7) y en GDI (>100).

En cuanto a la media de mejoras para los cuatro pacientes en los parámetros espaciotemporales, fueron:  $21.46 \pm 33.79\%$  en velocidad media,  $2.84 \pm 13.96\%$  para cadencia y  $17.95 \pm 20.45\%$  en longitud de paso.

### 3.4 VARIABLES CUALITATIVAS

La motivación de los usuarios fue evaluada por el personal encargado del estudio cada día de terapia. La medida media de motivación alcanzada por cada paciente en una escala de 0 a 10 puntos fue: 9.4 para P1, 8.6 para P2, 9.44 para P3 y 8.87 para P4. Además, tres de los cuatro pacientes disminuyeron su índice de kinesiofobia después de las 16 sesiones robóticas.

Los familiares de los cuatro pacientes rellenaron un cuestionario de evaluación funcional (Gillette) al comienzo del tratamiento y al final del mismo. Los resultados de estos cuestionarios muestran que todos los familiares piensan que la fuerza y la movilidad de los pacientes mejoró gracias a la terapia robótica. Además, la mitad de ellos incluyeron la resistencia como otro de los parámetros mejorados en el tratamiento. El 100% de los familiares encuestados se mostraron satisfechos con la terapia llevada a cabo en CPWalker, y aseguraron que la volverían a repetir.

Respecto a la opinión de los pacientes, en general todos los niños describieron el tratamiento como "muy divertido", "el robot te hace sentirte más independiente y ligero" y "seguro".

## 4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El principal objetivo de este paper fue proporcionar una primera aproximación sobre la implementación de una terapia robótica definida, la cual pueda cubrir los aspectos clínicos más importantes de la ICF-CY. Esta propuesta fue evaluada en cuatro pacientes pediátricos con PC, lo cual proporcionó resultados preliminares de nuestra investigación.

De acuerdo a los resultados, las mejoras más importantes correspondieron a los pacientes P1 y P3, que por su parte eran los niños con niveles más afectados de la GMFCS (III en ambos casos). En general, se alcanzaron valores más altos de velocidad de marcha y respuestas globales en distintos test realizados.

La parte más importante del tratamiento fue la *segunda fase*, donde se adaptó el nivel de asistencia a cada usuario según su progreso en la terapia.

Las mayores contribuciones de esta propuesta se dan en la posibilidad de ejercitar diferentes funciones de la marcha de una forma ordenada, individualizada por articulación y al mismo tiempo que se desarrolla un entrenamiento con desplazamiento real. Respecto al control postural llevado a cabo en paralelo al entrenamiento de marcha, consideramos que fue un factor clave del estudio.

Esta propuesta de tratamiento robótico puede ser implementada en cualquier dispositivo de rehabilitación de la marcha preparado para ello.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Biomecánica de Valencia su colaboración en el desarrollo del proyecto CPWalker. También se aprecia el aporte de la doctora Deborah Gaebler en el desarrollo de la propuesta de tratamiento.

Agradecemos a la empresa Made for Movement por su donación con el dispositivo NF-Walker.

Finalmente, damos gracias a todos los pacientes y familiares que colaboraron en este estudio.

### Referencias

- [1] Palisano R, Rosenbaum P, Walter S, Russell D, Wood E, Galuppi B. Gross Motor Function Classification System. *Dev Med Child Neurol* 1997;39:214–23.
- [2] Dietz V. Clinical Aspects for the Application of Robotics in Locomotor Neurorehabilitation. In: Reinkensmeyer DJ, Dietz V, editors. *Neurorehabilitation Technol.*, Springer; 2016, p. 209–21. doi:10.1007/978-3-319-28603-7\_11.
- [3] Meyer-Heim A, van Hedel HJ a. Robot-assisted and computer-enhanced therapies for children with cerebral palsy: current state and clinical implementation. *Semin Pediatr Neurol* 2013;20:139–45. doi:10.1016/j.spen.2013.06.006.
- [4] van Asseldonk EHF, van der Kooij H. Robot-Aided Gait Training with LOPES. In: Dietz V, editor. *Neurorehabilitation Technol.*, London: Springer London; 2012, p. 379–96. doi:10.1007/978-1-4471-2277-7\_21.
- [5] Bayón C, Ramírez O, Serrano JI, Castillo MD Del, Pérez-Somarriba A, Belda-Lois JM, et al. Development and evaluation of a novel robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy: CPWalker. *Rob Auton Syst* 2017;91:101–14. doi:10.1016/j.robot.2016.12.015.
- [6] Bartenbach V, Gort M, Riener R. Concept and Design of a Modular Lower Limb Exoskeleton. 6th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, 2016, p. 649–54. doi:10.1109/BIOROB.2016.7523699.
- [7] Bayón C, Lerma S, Ramírez O, Serrano JI, Del Castillo MD, Raya R, et al. Locomotor training through a novel robotic platform for gait rehabilitation in pediatric population: short report. *J Neuroeng Rehabil* 2016;13:98. doi:10.1186/s12984-016-0206-x.
- [8] Rüdts S, Moos M, Seppely S, Riener R,

- Marchal-Crespo L. Towards More Efficient Robotic Gait Training: A Novel Controller to Modulate Movement Errors. 6th IEEE RAS/EMBS Int Conf Biomed Robot Biomechatronics 2016:884–9.
- [9] Lefmann S, Russo R, Hillier S. The effectiveness of robotic-assisted gait training for paediatric gait disorders: systematic review. *J Neuroeng Rehabil* 2017;14:1. doi:10.1186/s12984-016-0214-x.
- [10] Wallard L, Dietrich G, Kerlirzin Y, Bredin J. Robotic-assisted gait training improves walking abilities in diplegic children with cerebral palsy. *Eur J Paediatr Neurol* 2017:1–8. doi:10.1016/j.ejpn.2017.01.012.
- [11] World Health Organization. International Classification of Functioning, Disability and Health, children and youth version. World Health Organization; 2007.
- [12] Faigenbaum, Avery D. Kramer, W. Blimkie C. Youth Resistance Training: updated position statement paper from the National Strength and Conditioning Association. *J Strength Con Res* 2009;23:60–79. doi:10.1519/JSC.0b013e31819df407.
- [13] Damiano DL, Abel MF, Di AD, Mf A. Functional outcomes for strenght training in spastic cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil* 1998;79:119–25.
- [14] Van Asseldonk EHF, Veneman JF, Ekkelenkamp R, Buurke JH, Van Der Helm FCT, Van Der Kooij H. The effects on kinematics and muscle activity of walking in a robotic gait trainer during zero-force control. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2008;16:360–70. doi:10.1109/TNSRE.2008.925074.
- [15] 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.
- [16] Rehabilitation Measures Database. Timed 10-Meter Walk Test. Timed 10-M Walk Test n.d. www.rehabmeasures.org (accessed August 11, 2016).
- [17] Crapo RO, Casaburi R, Coates AL, Enright PL, MacIntyre NR, McKay RT, et al. ATS statement: Guidelines for the six-minute walk test. *Am J Respir Crit Care Med* 2002;166:111–7. doi:10.1164/rccm.166/1/111.
- [18] Fowler EG, Staudt LA, Greenberg MB, Oppenheim WL. Selective Control Assessment of the Lower Extremity (SCALE): Development, validation, and interrater reliability of a clinical tool for patients with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 2009;51:607–14. doi:10.1111/j.1469-8749.2008.03186.x.
- [19] Russell DJ, Rosenbaum PL, Avery LM, Lane M. Gross motor function measure (GMFM-66 and GMFM-88) user’s manual. Press, Cambridge University; 2002.
- [20] Gorton GE, Stout JL, Bagley AM, Bevans K, Novacheck TF, Tucker CA. Gillette Functional Assessment Questionnaire 22-item skill set: Factor and Rasch analyses. *Dev Med Child Neurol* 2011;53:250–5. doi:10.1111/j.1469-8749.2010.03832.x.