

# 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

---

### Ingeniería de Control

---

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 FOTOBIOREACTORES 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 fotobioreactor 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>	
HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO .....	793
<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>	
SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS .....	806
<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>	
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....	821
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL .....	829
<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>	
DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO .....	844
<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>	
CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....	852
<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>	

# ESTIMADORES DE FUERZA Y MOVIMIENTO PARA EL CONTROL DE UN ROBOT DE REHABILITACIÓN DE EXTREMIDAD SUPERIOR

Aitziber Mancisidor Asier Zubizarreta Itziar Cabanes Pablo Bengoa Asier Brull  
{aitziber.mancisidor, asier.zubizarreta, itziar.cabanes, pablo.bengoa, abrull001}@ehu.es

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, UPV-EHU

## Resumen

*Con el fin de controlar adecuadamente los robots de rehabilitación, es imprescindible conocer la fuerza y el movimiento de interacción entre el usuario y el robot. Sin embargo, la medición directa a través de sensores de fuerza y posición no sólo aumenta la complejidad del sistema, sino que eleva el coste del dispositivo. Como alternativa a la medición directa, en este trabajo, se presentan nuevos estimadores de fuerza y movimiento para el control del robot de rehabilitación de extremidades superiores Universal Haptic Pantograph (UHP). Estos estimadores están basados en el modelo cinemático y dinámico del robot UHP y en las mediciones de sensores de bajo coste.*

*Con el objetivo de demostrar su eficacia, se han realizado varias pruebas experimentales. Estas pruebas comparan la respuesta del controlador con sensores adicionales y con los nuevos estimadores de fuerza y movimiento. Los resultados han revelado que el rendimiento del controlador es similar con los dos enfoques (inferior a 1N de diferencia en el error cuadrático medio). Esto indica que los estimadores de fuerza y movimiento propuestos pueden facilitar la implementación de controladores de robots de rehabilitación.*

**Palabras clave:** Estimador de fuerza, estimador de movimiento, control de impedancia, control de fuerza, robot de rehabilitación, validación experimental.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las alteraciones motoras son unas de las secuelas más frecuentes en personas que han sufrido un ataque cerebrovascular o ictus. El 80 % de los pacientes afectados por el ictus sufren algún déficit en su sistema motor [16]. Hoy en día, la forma más común de recuperar estas funcionalidades es realizar ejercicios de rehabilitación del miembro afectado. Sin embargo, con las técnicas convencionales, debido a limitaciones temporales, personales o económicas, en muchos casos, las horas de rehabilitación son limitadas.

Ante esta situación, los dispositivos robóticos han sido propuestos como una alternativa a los procedimientos convencionales de rehabilitación [18, 20]. Siendo muchos los dispositivos robóticos propuestos para la rehabilitación de extremidades superiores [3, 15] e inferiores [10, 19].

Una gran parte de estos trabajos se centra en el diseño mecánico de los dispositivos, analizando el tipo de estructura (serie o exoesqueleto) [2, 6], el número de grados de libertad, el tipo de actuadores [17], etc. Sin embargo, con el fin de asegurar que estos robots interactúen correctamente con el usuario, es imprescindible poseer un controlador adecuado y robusto. Un controlador apropiado puede mejorar el rendimiento del dispositivo robótico, mejorando significativamente el estado de recuperación del paciente. Por el contrario, el mal funcionamiento del controlador puede llegar a lesionar al usuario.

Las estrategias de control clásicas, como el control de posición, no consideran la dinámica de interacción entre el paciente y el robot, por lo que no son adecuadas para este tipo de aplicaciones. Para poder controlar esta interacción, es necesario implementar algoritmos de control avanzados que combinen mediciones de movimiento y fuerza. Los algoritmos basados en la impedancia mecánica del sistema, el control de impedancia [7], y su complementario el control de admitancia [11], son los más implementados.

El control de impedancia se basa en un controlador de fuerza con realimentación de posición, mientras que su complementario el control de admitancia es un controlador de posición con realimentación de fuerza. En ambos casos, controlan la relación fuerza/posición en todas las direcciones de movimiento. Además, poseen la capacidad de adaptarse al estado de recuperación de los pacientes, lo que los convierte en una de las mejores técnicas para dispositivos de rehabilitación [8].

Estos controladores avanzados de fuerza/posición precisan conocer los valores reales del movimiento y de la fuerza de interacción. Normalmente, estos valores se miden directamente usando sensores de fuerza y posición. Sin embargo, estos enfoques

causan varios inconvenientes [1, 5]: i) la colocación y el uso de los sensores introduce dificultades mecánicas y eléctricas, ii) las señales de los sensores requieren de un procesamiento adecuado debido al ruido y a su dependencia a la temperatura, y iii) en la mayoría de los casos, el precio de los sensores es muy elevado.

Otro enfoque implementado con éxito en varias aplicaciones robóticas industriales, es el uso de estimadores de fuerza y movimiento. Generalmente, estos estimadores se basan en la medición de sensores de posición de bajo coste, como encoders que miden el ángulo de rotación de los actuadores. Entre diferentes técnicas de estimación que se pueden encontrar en la bibliografía, las más extendidas se basan en el modelo cinemático y dinámico del dispositivo [4, 9].

En este contexto, en este trabajo, con el objetivo de reducir el coste y la complejidad del dispositivo robótico, se aplica el mismo concepto a los robots de rehabilitación. Se presentan estimadores de fuerza y movimiento para el robot de rehabilitación Universal Haptic Pantograph (UHP) [12, 13, 14]. El UHP es un robot de rehabilitación innovador para el entrenamiento completo de las extremidades superiores. Es decir, se usa para la rehabilitación de hombros, codos y muñecas en personas que sufren déficit motora después de un ictus.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera. En la Sección II, se describe brevemente el UHP y se introducen los parámetros necesarios para la formulación de los estimadores. En la sección III se detallan los estimadores de fuerza y de movimiento. En la sección IV, se analizan y se validan experimentalmente estos estimadores. Finalmente, las ideas más importantes se resumen en las conclusiones.

## 2. ROBOT DE REHABILITACIÓN UHP

El Universal Haptic Pantograph (UHP) es un robot de rehabilitación para el entrenamiento de las extremidades superiores (Fig. 1). Una de sus principales ventajas es la posibilidad de variar su estructura mecánica mediante el uso de tres articulaciones bloqueables/desbloqueables. Esto permite ocho diferentes modos de entrenamiento, que pueden ser utilizados para rehabilitar todas las articulaciones del miembro superior [14].

Entre estas ocho configuraciones mecánicas o modos de operación, este trabajo se centra en uno de los más utilizados, en el modo ARM. En este modo, el UHP ejecuta movimientos planares de flexión/extensión en un plano  $xy$  [14]. Esto permite

rehabilitar los tres movimientos del hombro (rotación, flexión/extensión y abducción/aducción) y el movimiento de flexión/extensión del codo.

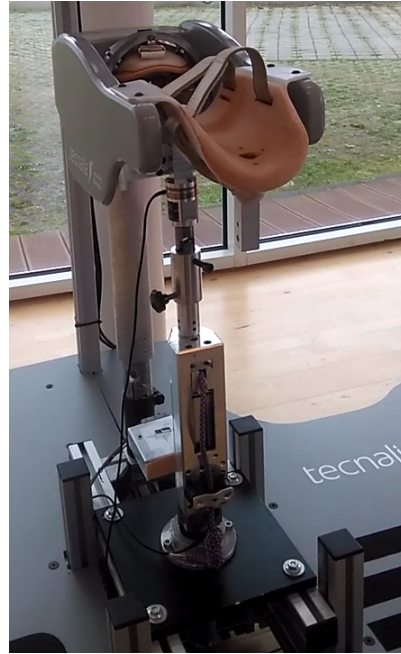


Figura 1: Robot de rehabilitación Universal Haptic Pantograph (UHP).

Mecánicamente, el UHP está compuesto por dos subsistemas: un sistema de accionamiento con componentes elásticos que genera fuerza y movimiento (Fig. 2), y una estructura cerrada en forma de pantógrafo donde el usuario interactúa con el UHP (Fig. 3).

Por lo que el movimiento del UHP es el resultado de las fuerzas ejercidas por el usuario sobre el pantógrafo ( $\mathbf{F}_{Cn}$ ) y los pares ejercidos por los motores a través del sistema de accionamiento ( $\tau_m$ ). Los dos subsistemas están conectados entre sí, lo que les permite transmitir bilateralmente las fuerzas ( $\mathbf{F}_{Tr}$ ) y los movimientos ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ) mostrados en las Figs. 2 y 3.

El sistema de accionamiento está formado por dos SEAs (Series Elastic Actuator) perpendiculares compuestos por dos motores rotativos Maxon RE40 ( $m_1$  and  $m_2$ ), cuatro muelles ( $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$  y  $M_D$ ) y una serie de poleas con radio  $r_m$ , unidas a través de un sistema de transmisión por cable. Como resultado, el sistema es capaz de ejercer fuerza ( $\mathbf{F}_{Tr}$ ) y movimiento ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ) en el pantógrafo en dos direcciones perpendiculares ( $x$  y  $y$ ). En cada dirección, un motor rotativo genera un par que se transmite a través de los cables a una pareja de muelles. De forma parecida, los muelles transmiten las fuerzas y los movimientos al punto  $\mathbf{P}_{Tr}$  del pantógrafo (Fig. 2).

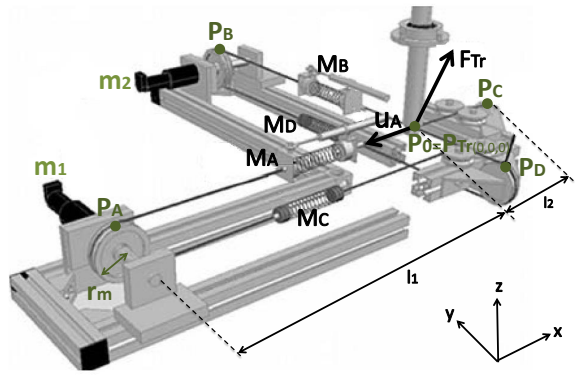


Figura 2: Sistema de accionamiento del UHP.

Como se muestra en la Fig. 3, el pantógrafo está compuesto por una estructura fija y tres barras móviles (accionada, transversal y paralela). Estas barras están unidas por cinco articulaciones ( $P_E$ ,  $P_F$ ,  $P_G$ ,  $P_H$  y  $P_I$ ), donde  $P_F$ ,  $P_H$  y  $P_I$  son bloqueables/desbloqueables. El pantógrafo es accionado por el sistema de accionamiento en el punto de transmisión ( $P_{Tr}$ ) y por el usuario en el punto de contacto ( $P_{Cn}$ ).

En el modo ARM, la articulación  $P_F$  está bloqueado, por lo que la barra accionada actúa como un único elemento rígido desde  $P_{Tr}$  a  $P_G$ . Además, con el fin de permitir el movimiento de las barras transversal y paralela, las articulaciones  $P_H$  y  $P_I$  están desbloqueadas. De esta forma el pantógrafo es capaz de realizar movimientos cuasi-planares hacia delante, hacia atrás, hacia la izquierda y hacia la derecha.

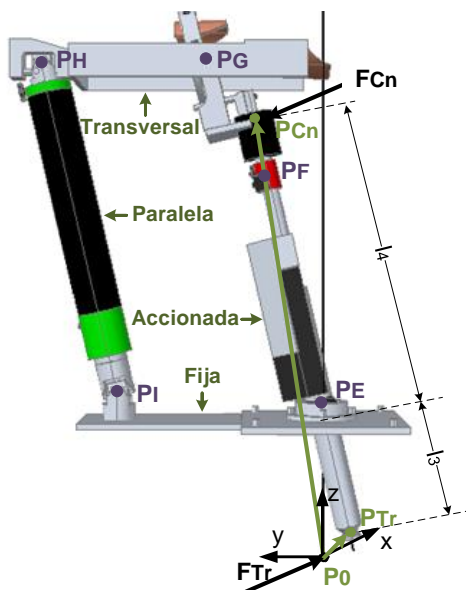


Figura 3: Pantógrafo en modo ARM ( $P_F$  esta bloqueada mientras  $P_H$  y  $P_I$  están desbloqueadas).

Por otro lado, la posición de equilibrio del UHP se logra cuando la barra accionada está en posición vertical, definiendo el origen ( $P_0$ ) del marco de referencia, base que aparece en las Figs. 2 y 3.

### 3. ESTIMADORES DE FUERZA Y MOVIMIENTO PARA EL CONTROL DE IMPEDANCIA

Con el objetivo de realizar las tareas habituales de rehabilitación, se ha diseñado un controlador de impedancia (Fig. 4). Como se ha mencionado en la introducción de este artículo, el controlador de impedancia controla la relación dinámica entre la fuerza ( $F_{Cn}$ ) y el movimiento ( $P_{Cn}$ ) del punto de contacto. Es decir, calcula la fuerza de contacto deseada ( $F_{CnDes}$ ) en función del error entre la posición real ( $P_{Cn}$ ) y deseada ( $P_{CnDes}$ ) del punto de contacto.

$$F_{CnDes} = (K_d + B_d s + M_d s^2) (P_{CnDes} - P_{Cn}) \quad (1)$$

donde  $K_d$  es la matriz de rigidez,  $B_d$  es la matriz de amortiguamiento y  $M_d$  es la matriz de inercias que definen la impedancia deseada del robot.

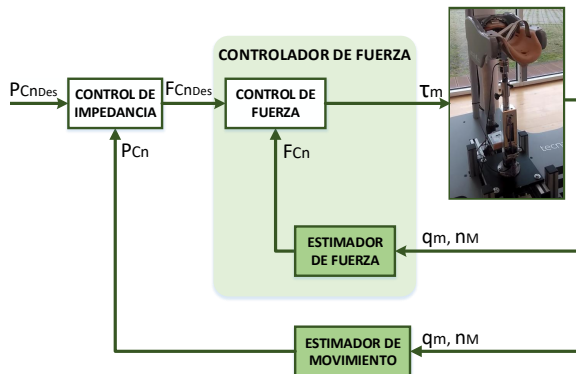


Figura 4: Controlador de impedancia del robot de rehabilitación UHP con estimadores de fuerza y movimiento.

Una vez calculada la fuerza deseada del punto de contacto ( $F_{CnDes}$ ) a partir de la Ec. 1, se utiliza un controlador de fuerza para asegurar que la fuerza real de contacto ( $F_{Cn}$ ) siga a la deseada ( $F_{CnDes}$ ). Comúnmente, la fuerza real contacto ( $F_{Cn}$ ) ha sido medida directamente por un sensor de fuerza. Sin embargo, este enfoque aumenta el coste y la complejidad mecánica y electrónica del dispositivo. Por lo tanto, con la intención de resolver esos inconvenientes, se ha utilizado un estimador de fuerza para sustituir a los sensores.

El estimador de fuerza propuesto utiliza el modelo dinámico del UHP y las mediciones de sensores comunes de bajo coste ya implementados en el



UHP: dos encoders ópticos integrados en los motores que miden su ángulo de rotación ( $q_{m_1}$  y  $q_{m_2}$ ), y dos potenciómetros lineales que miden la longitud variable ( $n_{M_A}$  y  $n_{M_B}$ ) de los muelles  $M_A$  y  $M_B$ . Además, esas señales se utilizan para estimar la posición del punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ), obteniendo un estimador de movimiento.

Ambos estimadores, de movimiento y fuerza, se detallarán en las siguientes subsecciones.

### 3.1. Estimador de Movimiento

El estimador propuesto calcula la posición real del punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ) basado en el modelo cinemático del UHP y las mediciones obtenidas de los encoders ( $q_{m_1}$  y  $q_{m_2}$ ) y de los potenciómetros lineales ( $n_{M_A}$  y  $n_{M_B}$ ).

En el modo ARM (Fig. 3), por su geometría específica, la posición del punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ) se relaciona con la posición del punto de transmisión ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ) como

$$\mathbf{P}_{Cn} = -\frac{l_3}{l_4}\mathbf{P}_{Tr} \quad (2)$$

donde  $l_3$  es la distancia entre el punto de transmisión ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ) y la articulación  $\mathbf{P}_E$ , y  $l_4$  es la distancia entre la articulación  $\mathbf{P}_E$  y el punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ).

Por lo tanto, como primer paso, se calcula la posición del punto de transmisión ( $\mathbf{P}_{Tr} = [x_{Tr} \ y_{Tr} \ z_{Tr}]^T$ ) a partir del modelo del sistema de accionamiento (Fig. 2). Y a continuación, la posición del punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ) es estimado con la Ec. 2.

A partir del análisis del sistema de accionamiento (Fig. 2) se obtiene la longitud variable de los muelles  $M_A$  y  $M_B$  ( $n_{M_A}$  y  $n_{M_B}$ ),

$$\begin{aligned} n_{M_A} &= l_A + q_{m_1} r_m - l_1 \\ n_{M_B} &= l_B + q_{m_2} r_m - l_1 \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $l_1$  es la distancia entre los motores y la posición de equilibrio del punto de transmisión ( $\mathbf{P}_0$ ),  $r_m$  es el radio de las poleas,  $l_A$  es la distancia entre el punto  $\mathbf{P}_A$  y  $\mathbf{P}_{Tr}$ , y  $l_B$  es la distancia entre el punto  $\mathbf{P}_B$  y  $\mathbf{P}_{Tr}$ .

Los valores de  $l_A$  y  $l_B$  en función de la posición del punto de transmisión,

$$\begin{aligned} l_A &= \mathbf{P}_A \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{(l_1 + x_{Tr})^2 + y_{Tr}^2} \\ l_B &= \mathbf{P}_B \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{x_{Tr}^2 + (l_1 - y_{Tr})^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Combinando las Ecs. 3 y 4,

$$\begin{aligned} \sqrt{(l_1 + x_{Tr})^2 + y_{Tr}^2} &= n_{M_A} - q_{m_1} r_m + l_1 \\ \sqrt{x_{Tr}^2 + (l_1 - y_{Tr})^2} &= n_{M_B} - q_{m_2} r_m + l_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Además, de la Fig. 3 se obtiene que, debido a la articulación esférica  $\mathbf{P}_E$ , el punto de transmisión  $\mathbf{P}_{Tr}$  realiza un movimiento esférico y por tanto puede describirse como,

$$x_{Tr}^2 + y_{Tr}^2 + (l_3 - z_{Tr})^2 = l_3^2 \quad (6)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones definido en las Ecs. 5 y 6 se obtienen las coordenadas espaciales ( $x_{Tr}$ ,  $y_{Tr}$ ,  $z_{Tr}$ ) del punto de transmisión  $\mathbf{P}_{Tr}$ . Y finalmente, introduciendo este valor en la Ec. 2, se calcula el valor de  $\mathbf{P}_{Cn}$  en función del ángulo de rotación de los motores ( $q_{m_1}$  y  $q_{m_2}$ ) y la longitud variable de los muelles superiores ( $n_{M_A}$  y  $n_{M_B}$ ).

### 3.2. Estimador de la Fuerza de Contacto

Una vez que se conoce el movimiento del punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ), se puede estimar la fuerza de contacto ( $\mathbf{F}_{Cn}$ ) en ese punto. Para ello, se utilizará el modelo dinámico del UHP, la posición de  $\mathbf{P}_{Cn}$  y las mediciones de los mismos sensores utilizados para el estimador de movimiento ( $n_{S_A}$ ,  $n_{S_B}$ ,  $q_{m_1}$  y  $q_{m_2}$ ).

Como sucede con el estimador de movimiento, debido a la geometría particular del UHP, en el modo de operación ARM (Fig. 3), la fuerza de contacto ( $\mathbf{F}_{Cn}$ ) y la fuerza de transmisión ( $\mathbf{F}_{Tr}$ ) tienen una relación definida por,

$$\mathbf{F}_{Cn} = \mathbf{T}_{ARM} \mathbf{F}_{Tr} \quad (7)$$

donde  $\mathbf{T}_{ARM}$  es la matriz de transformación definida como,

$$\mathbf{T}_{ARM} = -\frac{l_3}{l_4} \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad (8)$$

donde  $l_3$  es la distancia entre el punto de transmisión ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ) y la articulación  $\mathbf{P}_E$ ,  $l_4$  es la distancia entre la articulación  $\mathbf{P}_E$  y el punto de contacto ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ), y  $\mathbf{I}_{3 \times 3}$  es una matriz de identidad de dimensión 3.

Por otro lado, a partir del análisis dinámico del sistema de accionamiento, se obtiene que la fuerza de transmisión ( $\mathbf{F}_{Tr}$ ) es la suma de las fuerzas ejercidas por los cuatro muelles conectados al punto de transmisión ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ) (Fig. 2),

$$\mathbf{F}_{Tr} = \mathbf{F}_{M_A} + \mathbf{F}_{M_B} + \mathbf{F}_{M_C} + \mathbf{F}_{M_D} = \sum_{i=A}^D \mathbf{F}_{M_i} \quad (9)$$

La magnitud de la fuerza de cada muelle ( $F_{M_i}$ ) depende de su constante de rigidez ( $k_{M_i}$ ) y su longitud variable ( $n_{M_i}$ ), mientras que su dirección ( $\mathbf{u}_i$ ) depende del movimiento del punto de transmisión ( $\mathbf{P}_{Tr}$ ).

$$\mathbf{F}_{M_i} = F_{M_i} \mathbf{u}_i = k_{M_i} n_{M_i} \mathbf{u}_i \quad (10)$$

donde  $\mathbf{u}_i$  es el vector unitario direccional de  $\mathbf{P}_{Tr}\mathbf{P}_i$  para  $i = A, B, C, D$  (Fig. 2).

En la Ec. 10 aún hay dos parámetros desconocidos,  $n_{M_C}$  y  $n_{M_D}$ . Estos parámetros, se calculan mediante el análisis de la geometría del sistema de accionamiento (Fig. 2). Siguiendo el procedimiento utilizado para el cálculo de  $n_{M_A}$  y  $n_{M_B}$ ,

$$\begin{aligned} n_{M_C} &= l_C + q_{m_1} r_m - l_2 \\ n_{M_D} &= l_D + q_{m_2} r_m - l_2 \end{aligned} \quad (11)$$

donde  $r_m$  es el radio de las poleas,  $l_2$  es la distancia entre la posición de equilibrio del punto de transmisión ( $\mathbf{P}_0$ ) y el punto  $\mathbf{P}_C$  (o  $\mathbf{P}_D$ ) en la polea no actuada,  $l_C$  es la distancia entre los puntos  $\mathbf{P}_C$  y  $\mathbf{P}_{Tr}$ , y  $l_D$  es la distancia entre los puntos  $\mathbf{P}_D$  y  $\mathbf{P}_{Tr}$ . Además,  $l_C$  y  $l_D$  se pueden calcular como,

$$\begin{aligned} l_C &= \mathbf{P}_C \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{(x_{Tr} - l_2)^2 + y_{Tr}^2} \\ l_D &= \mathbf{P}_D \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{x_{Tr}^2 + (l_2 + y_{Tr})^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Por lo tanto, combinando las Ecs. 7-12 se estima la fuerza de contacto ( $\mathbf{F}_{Cn}$ ) entre el robot y el usuario a partir de las mediciones de los encoders y los potenciómetros lineales.

#### 4. RESULTADOS DE VALIDACIÓN

Se han realizado tres pruebas experimentales para demostrar la eficacia de los estimadores de fuerza y movimiento propuestos. En las dos primeras, con el fin de validar el estimador de fuerza, sólo se ha utilizado el controlador de fuerza. Mientras que en el último se ha añadido el de impedancia. En todas ellas, se ha comparado el rendimiento del controlador con estimadores y con sensores adicionales que miden directamente la posición ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ) y la fuerza ( $\mathbf{F}_{Cn}$ ) de contacto.

En la Tabla 1 se resumen los parámetros del prototipo UHP necesarios para la implementación de los estimadores.

El primer ensayo tiene como objetivo verificar que el controlador de fuerza con el estimador de fuerza funciona correctamente. Para ello, intentando emular a un paciente que intenta mantener la posición del robot constante, se ha bloqueado el

Tabla 1: Parámetros del prototipo UHP.

Parámetro	Valor
$r_m$	0,047m
$k_{M_i}$	4000N/m
$l_1$	0,575m
$l_2$	0,15m
$l_3$	0,18m
$l_4$	0,46m

pantógrafo en la posición de reposo ( $\mathbf{P}_{Cn} = \mathbf{0}$ ). Y se ha seleccionado una referencia variable de la fuerza de contacto ( $\mathbf{F}_{CnDes}$ ).

Normalmente, el UHP trabaja con frecuencias entre 0,1Hz y 1Hz [12]. Por lo que se han seleccionado tres señales sinusoidales con amplitud de 10N y periodo 10, 5 y 1 segundos (0,1Hz, 0,2Hz y 1Hz).

En la Fig. 5 se observan la fuerza de contacto deseada ( $\mathbf{F}_{CnDes}$ ), y la respuesta del controlador con el sensor ( $\mathbf{F}_{CnSensor}$ ) y con el estimador de fuerza ( $\mathbf{F}_{CnEstimador}$ ) en el eje x.

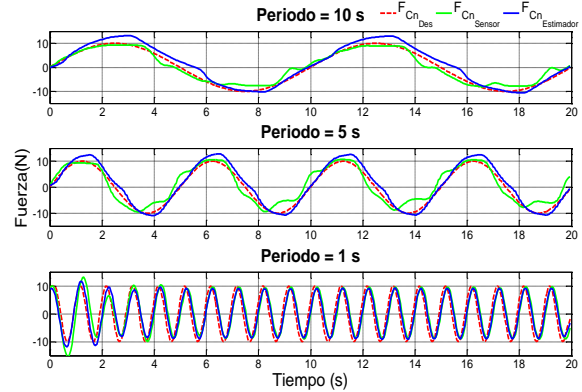


Figura 5: **Ensayo 1:** Validación del controlador de fuerza con estimador de fuerza con referencias sinusoidales de periodos de 10, 5 y 1 segundos.

Como se puede ver en la Fig. 5, en todos los ensayos realizados, el controlador ha sido capaz de seguir a la fuerza de referencia con un pequeño error. Al usar el sensor de fuerza, la media del error cuadrático medio (ECM) de los tres ensayos ha sido de 2,17N, mientras que con el estimador es de 2,22N.

El segundo ensayo tiene como objetivo validar el controlador de fuerza con estimador cuando la posición del robot UHP no es constante. Para ello, el usuario ha movido el prototipo UHP en todo el rango de movimiento del dispositivo robótico con

una velocidad aproximada de  $1m/s$ . Mientras que se ha seccionado una referencia de fuerza de  $0N$  ( $\mathbf{F}_{CnDes} = 0N$ ).

La Fig. 6 muestra la fuerza de contacto deseada ( $\mathbf{F}_{CnDes}$ ), y la respuesta del controlador de fuerza con el sensor ( $\mathbf{F}_{CnSensor}$ ) y con el estimador de fuerza ( $\mathbf{F}_{CnEstimador}$ ) en el eje  $y$ .

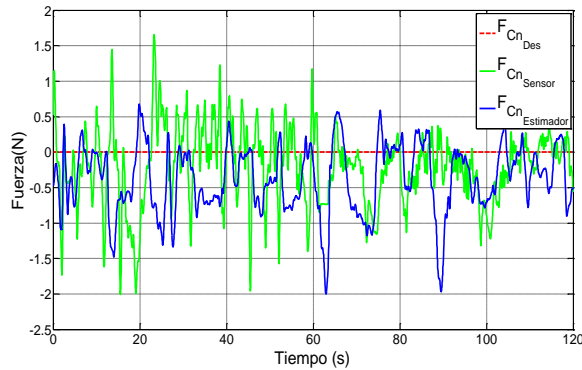


Figura 6: **Ensayo 2:** Validación del controlador de fuerza con estimador de fuerza con posición variable.

Como se puede observar en la Fig. 6, el rendimiento del controlador es parecido con las dos técnicas. Con el sensor de fuerza, el error medio de ECM en los ejes  $x$  y  $y$  es de  $0,58N$ , mientras que el error máximo es de  $2,01N$ . En el caso de usar el estimador, el error medio y el máximo son  $0,61N$  y  $2N$ , respectivamente.

Finalmente, se utiliza el controlador de impedancia para validar el sistema completo con estimadores de fuerza y movimiento. En el controlador de impedancia (1), la fuerza de referencia ( $\mathbf{F}_{CnDes}$ ) se calcula en términos del error entre el movimiento real ( $\mathbf{P}_{Cn}$ ) y deseado ( $\mathbf{P}_{CnDes}$ ) del punto de contacto.

En la Fig. 7, se muestran los resultados del controlador de impedancia con sensores de fuerza y posición, mientras que la Fig. 8 muestra la respuesta del controlador al utilizar estimadores de fuerza y movimiento.

Con el fin de ejecutar una validación realista, las trayectorias deseadas de movimiento, que se pueden observar en las figuras 7 y 8, han sido diferentes trayectorias de  $0,14m$ ,  $0,11m$  and  $0,05m$  de amplitud, seleccionadas aleatoriamente.

En los dos casos, el UHP ha ayudado al usuario a alcanzar el punto deseado ( $\mathbf{P}_{CnDes}$ ), realizando movimientos suaves y robustos. Además, con los dos métodos, el controlador ha sido capaz de seguir a la referencia deseada con un error inferior a  $6N$ . En el caso de utilizar los sensores el error ECM es de  $4,92N$ , mientras que con el estimador

es de  $5,84N$ .

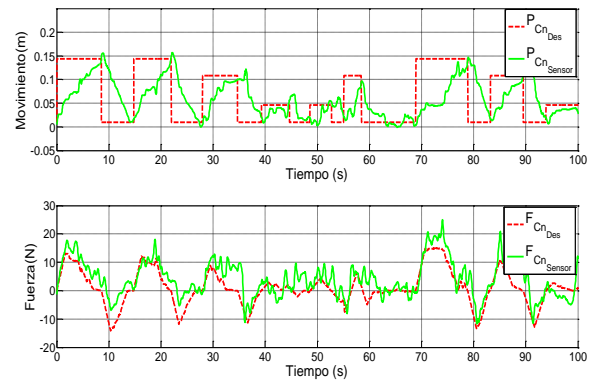


Figura 7: **Ensayo 3:** Resultados del controlador de impedancia con sensores de fuerza y posición.

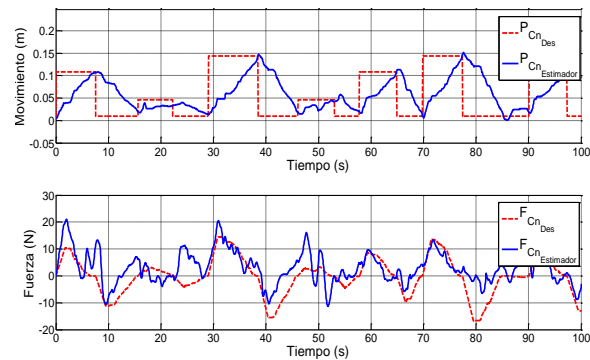


Figura 8: **Ensayo 3:** Resultados del controlador de impedancia con estimadores de fuerza y movimiento.

Como se puede observar, el rendimiento del controlador al utilizar los sensores es mejor que con los estimadores. Sin embargo, la diferencia entre los dos métodos es muy reducido,  $0,05N$  en el primer ensayo,  $0,03N$  en el segundo y  $0,92N$  en el último.

Conviene señalar que en aplicaciones asistenciales y sanitarias, el cumplimiento y la seguridad del dispositivo son aspectos más críticos que el seguimiento preciso de la trayectoria. Por lo tanto, dependiendo del nivel de deterioro del paciente, así como del tipo de ejercicio de rehabilitación a ejecutar, se pueden aceptar errores RMS de posición y fuerza inferiores a  $1cm$  y  $6N$ , que se obtuvieron en las pruebas experimentales.

A partir de los resultados experimentales se concluye que los estimadores de fuerza y movimiento propuestos son adecuados para el control de dispositivos robóticos de rehabilitación. Por lo que se pueden utilizar para sustituir sensores altamente cualificados de fuerza y movimiento.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado nuevos estimadores de fuerza y movimiento para el control de impedancia del robot de rehabilitación Universal Pantograph Haptic (UHP). El objetivo principal de estos estimadores es reemplazar los sensores extra de fuerza y posición que aumentan la complejidad mecánica y electrónica del dispositivo robótico, y disminuyen su asequibilidad.

Los estimadores propuestos están basados en el modelo cinemático y dinámico del robot, y en las señales medidas por sensores de bajo coste. En el caso del UHP, los sensores usados son: dos encoders ópticos que miden el ángulo de rotación de los motores, y dos potenciómetros lineales utilizados para medir la longitud variable de dos de los cuatro muelles del sistema de accionamiento.

Con el objetivo de verificar el rendimiento del controlador con los estimadores propuestos, se han realizado tres pruebas experimentales. Estas pruebas comparan la respuesta del controlador con sensores de fuerza y posición adicionales, y con los nuevos estimadores de fuerza y movimiento. Los resultados muestran que el controlador basado en los estimadores es capaz de seguir la fuerza deseada haciendo movimientos suaves y robustos. Mientras que la diferencia con el controlador con sensores es menor que  $1N$ , es decir, es más pequeña que la que puede ser detectada por el ser humano.

Por lo que se puede concluir que el nuevo enfoque de control basada en estimadores de fuerza y movimiento es apropiada para el control de dispositivos robóticos de rehabilitación.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO & FEDER en el marco del proyecto DPI-2012-32882, así como por las becas PRE-2014-1-152 del Gobierno Vasco y BES-2013-066142 del Ministerio de Economía y Competitividad, el proyecto IT914-16 del Gobierno Vasco, el proyecto PPG17/56 de la UPV/EHU y por Euskampus Fundazioa.

Además, los autores desean expresar su agradecimiento al centro de investigación Tecnalia por su colaboración y por prestar su robot de rehabilitación Universal Haptic Pantograph.

### Referencias

[1] H. Amini, V. Dabbagh, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, N. A. Mardi, and A. A. D. Sarhan. Robust control-based linear bilateral teleoperation system without force sensor. *Journal*

*of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 37(2):579–587, 2015.

- [2] M. Babaiasl, S. H. Mahdioun, P. Jaryani, and M. Yazdani. A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, pages 1–18, jan 2015.
- [3] J. Brackenridge, L. V. Bradnam, S. Lennon, J. J. Costi, and D. A. Hobbs. A Review of Rehabilitation Devices to Promote Upper Limb Function Following Stroke. *Neuroscience and Biomedical Engineering*, 4(1):25–42, 2016.
- [4] A. Colome, D. Pardo, G. Alenya, and C. Torras. External force estimation during compliant robot manipulation. *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3535–3540, 2013.
- [5] S. Etedali, H. A. Talebi, and A. D. Mohammadi. A robust force observer for robot manipulators subjected to external disturbance. *International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, (1):539–544, 2015.
- [6] R. A. R. C. Gopura, D. S. V. Bandara, K. Kiguchi, and G. K. I. Mann. Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robotics and Autonomous Systems*, 75:203–220, 2016.
- [7] N. Hogan. Impedance Control: An Approach to Manipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1), 1985.
- [8] N. Jarrassé, T. Proietti, V. Crocher, J. Robertson, A. Sahbani, G. Morel, and A. Roby-Brami. Robotic Exoskeletons: A Perspective for the Rehabilitation of Arm Coordination in Stroke Patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(947):1–13, 2014.
- [9] M. Linderth, A. Stolt, A. Robertsson, and R. Johansson. Robotic force estimation using motor torques and modeling of low velocity friction disturbances. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3550–3556, 2013.
- [10] W. Meng, Q. Liu, Z. Zhou, Q. Ai, B. Sheng, and S. S. Xie. Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation. *Mechatronics*, 31:132–145, 2015.

- [11] N. Nordin, S.-q. Xie, and B. Wünsche. Assessment of movement quality in robot-assisted upper limb rehabilitation after stroke: a review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11:137(1):1–23, 2014.
- [12] J. Oblak, I. Cikajlo, T. Keller, J. C. Perry, J. Veneman, and Z. Matja. The Role of Viscous Damping on Quality of Haptic Interaction in Upper Limb Rehabilitation Robot : A Simulation Study. *IFMBE Proceedings*, pages 383–386, 2010.
- [13] J. Oblak and Z. Matjačić. Design of a series visco-elastic actuator for multi-purpose rehabilitation haptic device. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 8:3:1–13, 2011.
- [14] J. C. Perry, J. Oblak, J. H. Jung, I. Cikajlo, J. F. Veneman, N. Goljar, N. Bizoviar, Z. Matjai, and T. Keller. Variable structure pantograph mechanism with spring suspension system for comprehensive upper-limb haptic movement training. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 48(4):317–334, 2011.
- [15] T. Proietti, V. Crocher, A. Roby-Brami, and N. Jarrasse. Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: a review on control strategies. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 9:4–14, 2016.
- [16] B. Sheng, Y. Zhang, W. Meng, C. Deng, and S. Xie. Bilateral robots for upper-limb stroke rehabilitation: State of the art and future prospects. *Medical Engineering & Physics*, 38(7):587–606, 2016.
- [17] A. J. Veale and S. Q. Xie. Towards compliant and wearable robotic orthoses: A review of current and emerging actuator technologies. *Medical Engineering & Physics*, 38(4):317–325, 2016.
- [18] S. Xie. Advanced Robotics for Medical Rehabilitation. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 108:1–357, 2016.
- [19] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, and N. Vitello. Review of assistive strategies in powered lower limb orthoses and exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, 64:120–136, 2015.
- [20] S.-H. Zhou, J. Fong, V. Crocher, Y. Tan, D. Oetomo, and I. Mareels. Learning control in robot-assisted rehabilitation of motor skills â“ a review. *Journal of Control and Decision*, 3(1):19–43, 2016.