

# 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 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>	

# Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial

Julio Salvador Lora Millán<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Automática y Robótica (CAR-CSIC), Crta. Campo Real Km 0.200 Arganda del Rey (Madrid), julio.lora@csic.es

Roberto López Blanco<sup>2</sup>, Jesús González de la Aleja<sup>2</sup>, Eduardo Rocon de Lima<sup>1</sup>

<sup>2</sup>Instituto de investigación Hospital Universitario 12 de Octubre (i+12), Av de Córdoba s/n (Madrid)

## Resumen

*Este documento describe una plataforma para analizar los efectos de la estimulación mecánica aferente en pacientes con Temblor Esencial (TE). El temblor esencial es una enfermedad caracterizada por provocar temblor bilateral, cinético y postural en antebrazos y manos del paciente. El propósito de la plataforma descrita es esclarecer el papel que juegan determinadas estructuras cerebrales en la génesis del temblor. Para ello se utilizan estimuladores piezoeléctricos capaces de generar una vibración mecánica controlada que estimule los corpúsculos de Paccini del paciente, así como sensores inerciales encargados de monitorizar los efectos que tiene esta estimulación en el temblor de los pacientes. El protocolo propuesto para seguir en los ensayos experimentales, así como el análisis de datos posterior son descritos también en este documento.*

**Palabras Clave:** Estimulación Mecánica Aferente, Temblor esencial, Sensor Inercial, Estimulador Piezoeléctrico.

## 1 INTRODUCCIÓN

El temblor esencial (TE) se considera una enfermedad neurodegenerativa [1] aunque su origen es incierto. Afecta aproximadamente al 5% de la población de más de 65 años [2], considerándose el trastorno de movimiento más común en adultos [3]. El TE se caracteriza por provocar temblor bilateral, simétrico, cinético y postural en las manos y antebrazos del paciente, en algunas ocasiones puede ir acompañado por temblor cefálico [4]. El 75% de los pacientes de TE encuentran que esta enfermedad interfiere de manera significativa en sus vidas [5], concretamente en sus actividades diarias, su empleo y sus relaciones sociales[6].

Los procesos patofisiológicos que intervienen en la génesis del temblor son mayormente especulativos, aunque muchos estudios coinciden en que se encuentra involucrado el siguiente circuito neuronal: la oliva inferior, el cerebelo, el tálamo (núcleo ventral intermedio) y el cortex motor [7], [8]. Recientes estudios post-mortem han demostrado la pérdida de células Purkinje en pacientes con TE [9],

sugiriendo que el TE está directamente relacionado con disfunción cerebelosa [10]. Así mismo también hay indicios de que las estructuras cerebrales implicadas en la generación, transmisión y mantenimiento del TE son las redes olivo-cerebelar y talamocortical [11].

Recientes experimentos consistentes en la estimulación aferente mediante estimulación eléctrica transcutánea han conseguido una reducción significativa del temblor de forma transitoria en varios pacientes [12]. Este descubrimiento está en concordancia con un reciente trabajo sobre la restauración de la locomoción en roedores modelos de la enfermedad de Parkinson mediante la estimulación de la medula espinal [13]. Además, numerosas evidencias sustentan la idea de que la estimulación de las vías aferentes puede aliviar los síntomas del temblor [14]. Todas estas conclusiones por tanto podrían indicar que las manifestaciones del temblor se ven afectadas por la estimulación aferente.

Siguiendo esta línea, la plataforma y el protocolo experimental expuestos en este documento pretenden analizar los efectos sobre el temblor al generar estimulación aferente a través de la estimulación de los mecanorreceptores de la piel. La hipótesis de que el temblor se vea afectado por la estimulación mecánica aferente está sustentada por el hecho de que existen fuertes neuronas inhibitorias (GABAérgicas) en el núcleo cuneiforme proyectando al núcleo olivar inferior. Además, la estimulación eléctrica del núcleo cuneiforme en gatos ha demostrado la disminución de la actividad en el núcleo olivar inferior [15].

Los mecanorreceptores son receptores sensoriales que responden a la presión mecánica, activándose por una deformación debida a tacto, presión, estiramiento o vibración de la piel [16]. Existen cuatro tipos principales de mecanorreceptores: corpúsculos de Paccini, corpúsculos de Meissner, discos de Merkel y terminaciones de Ruffini. La capacidad de detectar la vibración cutánea depende de dos de estos mecanorreceptores: los corpúsculos de Paccini son los encargados de detectar las altas frecuencias (80-450Hz) mientras que los corpúsculos de Meissner son los responsables de la detección de bajas

frecuencias (10-80Hz) [17]. Cuando son estimulados, los mecanorreceptores transmiten la información sensorial hasta el núcleo cuneiforme ipsilateral [17]. Algunos estudios sugieren que la fuente dominante de la inhibición inducida por la estimulación mecánica aferente procede de los corpúsculos de Paccini [16].

La plataforma que se propone en este documento se basa en actuadores piezoeléctricos capaces de producir una vibración mecánica controlada. Para evaluar los efectos sobre el temblor, se utilizan sensores inerciales que miden el movimiento de la articulación afectada, tal y como ya se ha hecho en estudios previos [12], [18], [19]. Así mismo, en este documento se detalla el protocolo a seguir durante los ensayos experimentales, monitorizando al paciente con y sin estimulación, de cara a comparar los resultados obtenidos y determinar los efectos de la estimulación mecánica aferente sobre las métricas del temblor.

## 2 COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema desarrollado está compuesto por los siguientes componentes (Figura 1): tres tipos diferentes de actuadores piezoeléctricos (QP-10W, PPA-4011 y PPA-1022, Mide Technology, US) con sus respectivos controladores (DRV8662, Texas Instruments, US), una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) (NI USB 6003, National Instruments, US), un sistema comercial de medida inercial de movimientos (TechMCS, Technaid, ES), y un ordenador estándar (Interl Core i7 a 2.2GHz).

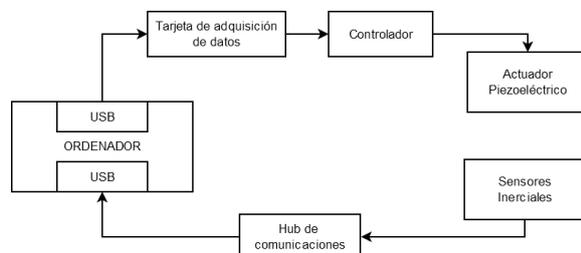


Figura 1: Componentes del sistema: 1) Sensores inerciales, 2) Hub de comunicaciones, 3) Ordenador estándar con software de gestión de la plataforma, 4) Tarjeta de adquisición de datos, 5) Controladores para piezoeléctricos, 6) Actuadores piezoeléctricos.

Tres diferentes tipos de actuadores se han seleccionados para adecuar su tamaño a la forma del área que ha de estimular (38.1mm x 50.8mm para el antebrazo, 71.0mm x 25.4mm para la palma de la mano y 53.00x10.3mm para el pulpejo de los dedos). Estos vibradores cerámicos son capaces de cambiar de forma y grosor en función de la tensión que se aplique en sus bornes, así se generan vibraciones mecánicas de la misma frecuencia que las señales de control generadas por el DAQ y amplificadas por los

controladores. Las señales de control son muestreadas a 5kHz, además son totalmente configurables en amplitud y frecuencia, pudiendo llegar hasta los 100V y 450Hz respectivamente. El DAQ se comunica con el ordenador a través de un puerto USB para controlar y monitorizar los parámetros de estimulación (frecuencia y amplitud).

Para medir la repercusión de la estimulación en el temblor de los pacientes se utilizan dos sensores inerciales colocados en la palma de la mano y el antebrazo respectivamente. De esta forma, es posible medir la velocidad angular tridimensional de cada segmento. Un hub de comunicaciones es el encargado de configurar y adquirir los datos provenientes de los sensores a una frecuencia de 100Hz.

## 3 CONTROL DE LA PLATAFORMA

En cuanto al proceso de monitorización, los parámetros de la estimulación y las velocidades angulares son almacenadas simultáneamente, asignando a cada paquete de datos una misma marca temporal.

En lo relativo al control de la plataforma, el sistema puede ser controlado manualmente o siguiendo tres diferentes modos de operación predefinidos. En el primer caso, el operario es el encargado de configurar el inicio y fin del proceso, así como de iniciar y finalizar la estimulación y configurar la amplitud y la frecuencia de las ondas senoidales generadas que actúan como señales de control.

En cuanto a los modos de operación predefinidos, el proceso de monitorización y control del estímulo están sincronizados, comenzando la grabación de datos al inicio del protocolo y finalizando automáticamente una vez que el protocolo termina. Estos modos de operación siempre siguen una estructura común: 1) No estimulación durante  $T_{NE}$  segundos; 2) Estimulación durante  $T_E$  segundos; 3) No estimulación durante  $T_{NE}$  segundos. Los tiempo de estimulación y no estimulación ( $T_E$  y  $T_{NE}$  respectivamente) son configurables por el operario.

Los modos de operación predefinidos utilizan durante la estimulación una amplitud constante y definida por el operario. No obstante la frecuencia de estimulación difiere en función del modo de operación:

- Estimulación normal: el actuador piezoeléctrico es excitado a una única frecuencia definida por el operario.
- Estimulación creciente: el operario define las frecuencias máxima y mínima así como el intervalo entre frecuencias. La frecuencia de la señal de control aumenta desde la

mínima hasta la máxima a intervalos constantes.

- Estimulación aleatoria: al igual que el caso anterior, el operario define las frecuencias máxima y mínima y el intervalo entre frecuencias. Las frecuencias de la señal de control son las mismas que en el caso anterior pero siguiendo un orden aleatorio.

A pesar de los cambios que se producen en la frecuencia de estimulación a los largo del tiempo, en todo instante todos los actuadores estimulan a la misma frecuencia. Por otro lado, dentro de cada modo de operación, la señal de control estimula a cada frecuencia el mismo intervalo de tiempo.

El software para el control y monitorización de los experimentos ha sido desarrollado utilizando National Instrument LabVIEW 2015 (National Instruments, US). Este software presenta una interfaz amigable e intuitiva para que el operario configure todos los parámetros que tiene a su alcance.

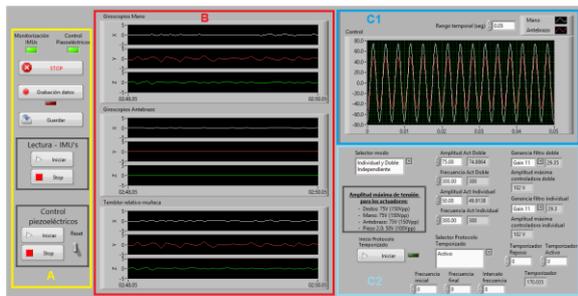


Figura 2: Interfaz de control: A.- Control manual para el inicio y fin del proceso; B.- Velocidad angular tridimensional de cada sensor y temblor relativo de la muñeca; C1.- Señal de control aplicada a los actuadores; C2.- Parámetros de configuración para el control de los modos predefinidos de operación.

La interfaz de usuario presenta tres secciones diferenciadas:

- A) Control manual del sistema: permite iniciar y finalizar por parte del operario los estimulación, monitorización de los sensores inerciales y grabación de datos.
- B) Datos inerciales. Cada sensor inercial envía al software de control la información de un giróscopo de tres ejes. Las seis primeras gráficas de la interfaz se corresponden con la velocidad angular en cada eje del sensor inercial colocado sobre la mano y sobre el antebrazo.

La velocidad angular de la muñeca ( $\omega_w$ ) se representa en las tres gráficas inferiores. Asumiendo que los desplazamientos que tienen lugar son muy pequeños, se puede aproximar la velocidad en la muñeca como

la diferencia entre la velocidad de la mano ( $\omega_h$ ) y el antebrazo ( $\omega_f$ ).

$$\omega_w = \omega_h - \omega_f \quad (1)$$

- C) Control avanzado de los actuadores piezoeléctricos y modos de operación predefinidos.

C1) Para conocer con exactitud la frecuencia y amplitud de las señales de control, la tarjeta de adquisición registra estas señales. Los resultados obtenidos se representan en tiempo real en la interfaz.

C2) Incluye los controles para la configuración de las señales de estimulación tanto para el control manual como para los controles predefinidos.

## 4 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para la participación en los ensayos, se reclutarán entre 15 y 20 pacientes de TE en las consultas de Neurología Clínica del Hospital Universitario 12 de Octubre en Madrid. Los criterios de inclusión serán una edad superior a 18 años y que cumplan con los criterios para la diagnosis de TE [20]. Se consideran excluidos para el estudio pacientes con marcapasos o estimulador cerebral implantados, o con historial de epilepsia, trauma cerebral o ictus. Todos los procedimientos han sido aprobados por el comité ético del Hospital Universitario 12 de Octubre, así mismo los participantes habrán de dar su consentimiento por escrito para la realización de los ensayos.

Antes de empezar cada ensayo, los pacientes son examinados por un neurólogo que determina el brazo sobre el que se va a aplicar la estimulación, buscando aquél que muestre una mayor presencia de temblor.

Los actuadores piezoeléctricos se colocan en los pulpejos de los dedos, la palma de la mano y zonas del antebrazo sin presencia de vello corporal (Figura 3), lugares donde la densidad de corpúsculos de Paccini es mayor [21]. Los sensores inerciales se adhieren a la zona dorsal de la mano y el antebrazo, según se muestra en la Figura 4, de manera que pueda medirse el movimiento relativo de la muñeca.

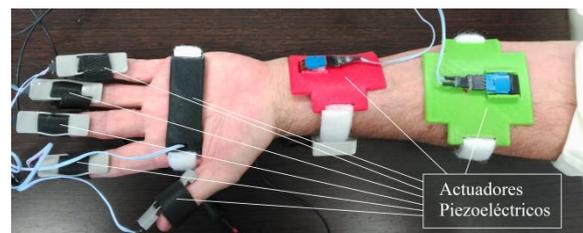


Figura 3: Colocación de los actuadores piezoeléctricos durante un ensayo.

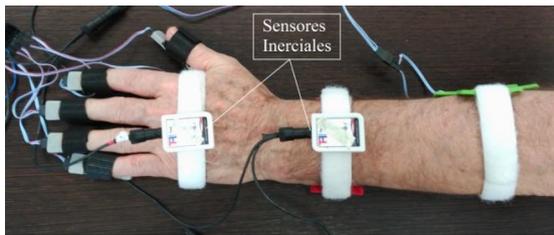


Figura 4: Colocación de los sensores inerciales durante un ensayo.

Para estandarizar el proceso de medida y garantizar la repetitividad de los ensayos, se ha diseñado una estructura de soporte para el brazo del paciente. De esta forma se asegura que todos los pacientes mantienen la misma posición durante los ensayos. Así mismo, se consigue reducir la fatiga al paciente y hacerle menos molesto el desarrollo experimento.

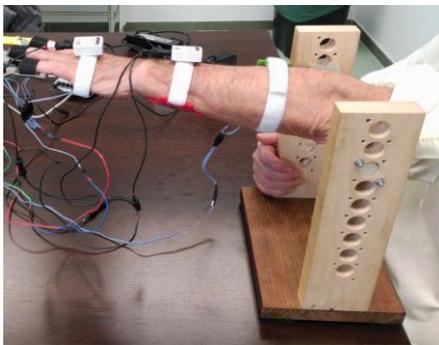


Figura 5: Paciente durante el desarrollo de un ensayo

Esta estructura de soporte ha sido desarrollada para sostener el peso del brazo del paciente, pero permitir la movilidad completa de la muñeca, de manera que no se comprometan los resultados del ensayo. Puesto que el TE se caracteriza por el temblor postural [4], durante el experimento se le pide al paciente que mantenga rectos brazo, antebrazo y mano en una posición paralela al suelo en contra de la gravedad. De esta manera se dan las condiciones necesarias para que aparezca el temblor y así poder medir su variación.

El protocolo experimental se divide en cinco fases de medidas; en todas las que se producen procesos de estimulación y no estimulación, los parámetros  $T_E$  y  $T_{NE}$  se mantienen constantes a 120 y 60 segundos respectivamente:

1. No estimulación: se monitoriza durante 300 segundos el temblor del paciente mientras no se aplica ningún tipo de estimulación.
2. Estimulación placebo: se aplica una estimulación predefinida siguiendo el modo normal de funcionamiento. La frecuencia de estimulación se fija a 50Hz, frecuencia a la cual no se produce excitación de los corpúsculos de Paccini [17].
3. Estimulación terapéutica: se aplica el mismo modo de operación que en el caso anterior

variando la frecuencia de estimulación a 250Hz.

4. Estimulación creciente: se aplica una estimulación predefinida siguiendo el modo creciente de funcionamiento. La frecuencia de estimulación comienza a 50Hz y aumenta hasta los 450Hz en intervalos de 50Hz; cada frecuencia es aplicada durante 13.33 segundos.
5. Estimulación aleatoria: se aplica una estimulación predefinida siguiendo el modo aleatorio de funcionamientos. El rango de frecuencias aplicados comienza en 50Hz y aumenta hasta los 450Hz en intervalos de 50Hz. El orden de aplicación de este rango de frecuencia es definido aleatoriamente, aplicándose estimulación a cada frecuencia durante 13.33 segundos.

A pesar de que la frecuencia de estimulación varía a lo largo de los ensayos, la amplitud de la señal de control se mantiene constante al nivel en el que se consigue el máximo efecto mecánico (50V para el PPA-1022 y 75V para los QP-10W y PPA-4011).

Además de los periodos descritos de estimulación y monitorización, periodos de descanso se intercalan entre ellos. De esta manera se previenen efectos aditivos de las diferentes estimulaciones y se consigue hacer más cómodo el ensayo para el paciente. Cada periodo de descanso tiene una duración aproximada de 10 minutos, de manera que la duración total de una sesión experimental dura aproximadamente 90 minutos.

## 5 ANÁLISIS DE DATOS

Una vez que la velocidad angular de la muñeca ha sido calculada siguiendo (1), se aplica un filtro de Butterworth paso-banda entre 3 y 12Hz. De esta manera se extrae únicamente la información relativa al movimiento producido por el temblor, excluyéndose otros tipos de movimiento o el ruido del sensor.

Para analizar los efectos producidos por cada frecuencia de estimulación, los datos se han clasificado en función de ella. Especial atención reclaman las medidas durante la no-estimulación, puesto que hay que diferenciar entre medidas pre-estimulación y post-estimulación. Para el análisis de datos se propone el valor RMS (*Root Mean Squared*) del modulo de la velocidad angular tridimensional para cada tipo de estimulación.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se muestran los resultados de las cinco fases de un ensayo sobre un paciente con TE, se trata de un varón de 81 años que lleva padeciendo TE durante 10 años (nivel 2 de temblor según la escala Fahn-Tolosa-Marin).

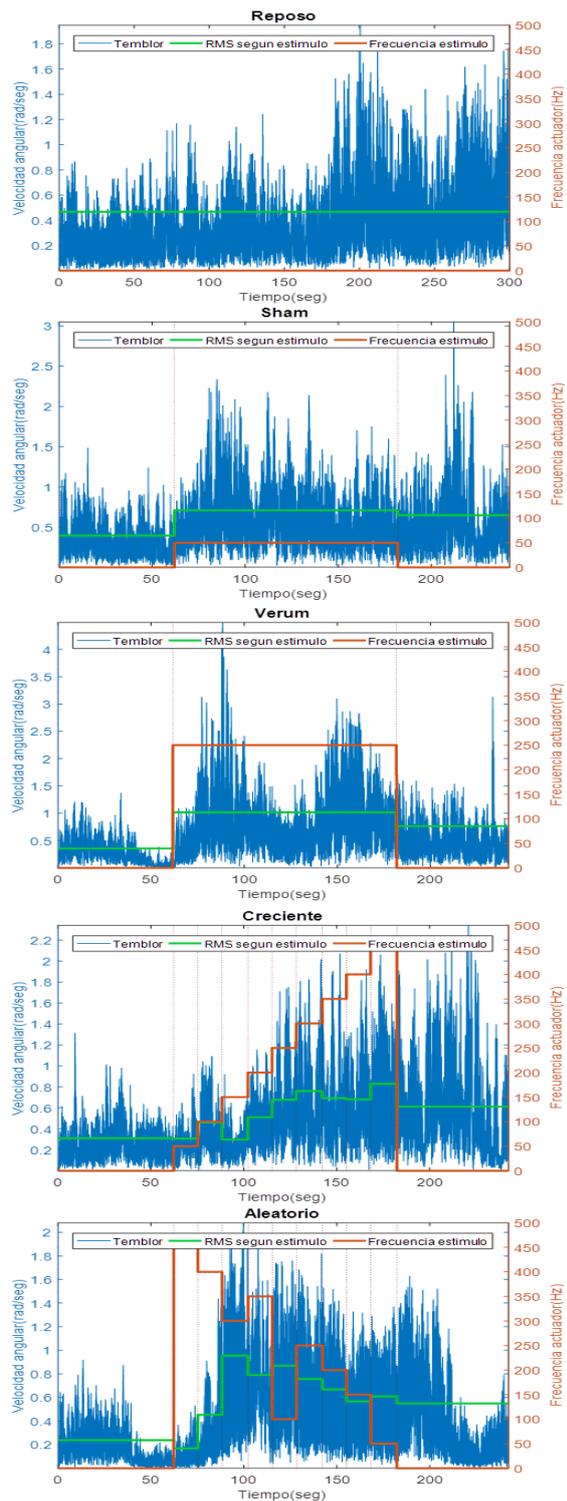


Figura 6: Resultado de un ensayo sobre un paciente con TE: eje X: tiempo(seg) ; eje Y izquierdo: velocidad angular (rad/seg) ; eje Y derecho: frecuencia estimación (Hz). La línea azul representa el temblor medido por los sensores inerciales, la línea verde es el valor RMS de la medida teniendo en cuenta el intervalo en el que los actuadores estimulan a una misma frecuencia, la línea marrón indica la frecuencia de estimulación en cada instante de tiempo.

Como se puede comprobar la variabilidad del temblor (línea azul) es un factor a tener en cuenta a la hora de hacer un análisis de los datos. Haciendo un análisis preliminar los valores eficaces del temblor durante cada estimulación (línea verde) varían conforme varía la frecuencia de estimulación (línea naranja). Representando el valor eficaz del temblor durante cada estimulación frente a la frecuencia de estimulación (Figura 7) no solo se aprecia el aumento del temblor cuando se inicia la estimulación, al compararlo con la medida pre-estimulo, sino que también se ve como el temblor durante el post-estimulo es mayor al temblor pre-estimulo.

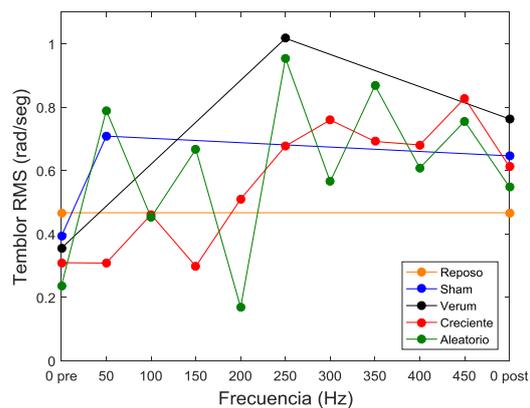


Figura 7: Representación del Temblor RMS medido durante cada estimulación frente a la frecuencia de estimulación en cada instante.

Queda pendiente para futuros estudios realizar un análisis estadístico exhaustivo de un mayor número de ensayos tanto en pacientes con TE como en sujetos sanos. Así se conseguirá una muestra de mayor tamaño que permita analizar en detalle las implicaciones y correlaciones entre la estimulación de las vías aferentes a través de los corpúsculos de Paccini con las manifestaciones del temblor en pacientes con TE.

**Agradecimientos**

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto ESSENTIAL, DPI2015-72638-EXP financiada por el programa Proyectos 'Explora-Ciencia' y 'Explora-Tecnología', en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016.

**Referencias**

- [1] U. Bonuccelli, “Essential tremor is a neurodegenerative disease,” *J. Neural Transm.*, vol. 119, no. 11, pp. 1383–1387, Nov. 2012.
- [2] E. D. Louis, “Essential tremor,” *Lancet Neurol.*, vol. 4, no. 2, pp. 100–110, 2005.
- [3] J. Benito-León, “Essential tremor: One of the most common neurodegenerative diseases?,”

- Neuroepidemiology*, vol. 36, no. 2, pp. 77–78, 2011.
- [4] G. Deuschl *et al.*, “Consensus Statement of the Movement Disorder Society on Tremor,” *Mov. Disord.*, vol. 13, no. S3, pp. 2–23, 1998.
- [5] K. L. Busenbark, J. Nash, S. Nash, J. P. Hubble, and W. C. Koller, “Is essential tremor benign?,” *Neurology*, vol. 41, no. 12, pp. 1982–1983, Dec. 1991.
- [6] E. D. Louis *et al.*, “Correlates of functional disability in essential tremor,” *Mov. Disord.*, vol. 16, no. 5, pp. 914–920, Sep. 2001.
- [7] B. Hellwig *et al.*, “Tremor-correlated cortical activity in essential tremor,” *Lancet*, vol. 357, no. 9255, pp. 519–523, 2001.
- [8] J. Raethjen and G. Deuschl, “The oscillating central network of Essential tremor,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 123, no. 1, pp. 61–64, 2012.
- [9] E. D. Louis, P. L. Faust, and J. P. G. Vonsattel, “Purkinje cell loss is a characteristic of essential tremor: Towards a more mature understanding of pathogenesis,” *Parkinsonism and Related Disorders*, vol. 18, no. 8, pp. 1003–1004, 2012.
- [10] E. D. Louis, “Essential tremor: evolving clinicopathological concepts in an era of intensive post-mortem enquiry,” *Lancet Neurol.*, vol. 9, no. 6, pp. 613–622, 2010.
- [11] R. J. Elble, “Tremor: Clinical Features, Pathophysiology, and Treatment,” *Neurologic Clinics*, vol. 27, no. 3, pp. 679–695, 2009.
- [12] S. Dosen *et al.*, “Online tremor suppression using electromyography and low-level electrical stimulation,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 385–395, 2015.
- [13] R. Fuentes, P. Petersson, W. B. Siesser, M. G. Caron, and M. A. Nicolelis, “Spinal cord stimulation restores locomotion in animal models of Parkinson’s disease,” *Science (80-. )*, vol. 323, no. 5921, pp. 1578–1582, Mar. 2009.
- [14] R. Fuentes, P. Petersson, and M. A. L. Nicolelis, “Restoration of locomotive function in Parkinson’s disease by spinal cord stimulation: Mechanistic approach,” *Eur. J. Neurosci.*, vol. 32, no. 7, pp. 1100–1108, Oct. 2010.
- [15] P. Geborek, H. Jörntell, and F. Bengtsson, “Stimulation within the cuneate nucleus suppresses synaptic activation of climbing fibers,” *Front. Neural Circuits*, vol. 6, no. January, p. 120, 2012.
- [16] D. G. Ferrington, B. S. Nail, and M. Rowe, “Human tactile detection thresholds: modification by inputs from specific tactile receptor classes,” *J. Physiol.*, vol. 272, no. 2, pp. 415–433, 1977.
- [17] E. Kandel, J. Schwartz, and T. Jessel, *Principles of Neural Science*. 2000.
- [18] J. Á. Gallego, E. Rocon, J. M. Belda-Lois, and J. L. Pons, “A neuroprosthesis for tremor management through the control of muscle co-contraction,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 10, no. 36, pp. 1–13, 2013.
- [19] J. H. Heo *et al.*, “Sensory electrical stimulation for suppression of postural tremor in patients with essential tremor,” *Biomed. Mater. Eng.*, vol. 26, pp. S803–S809, 2015.
- [20] P. Bain *et al.*, “Criteria for the diagnosis of essential tremor,” *Neurology*, vol. 54, no. 11 Suppl 4, p. S7, 2000.
- [21] E. Bruce Goldstein, *Sensation and perception*, 8th ed. Schreiber, Linda, 2010.