

# 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

Núñez, 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 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. Zamarreño, 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 Rodríguez-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>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico .....	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias .....	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

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

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



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

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

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

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

---

### Sistemas de Tiempo Real

---

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

---

### Visión por Computador

---

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

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

# MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES

Alejandro Suárez Fernández-Miranda  
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, [asuarezfm@us.es](mailto:asuarezfm@us.es)

Guillermo Heredia Benot, Aníbal Ollero Baturone  
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, [guiller@us.es](mailto:guiller@us.es), [aollero@us.es](mailto:aollero@us.es)

## Resumen

*Este artículo presenta el primer robot manipulador aéreo con dos brazos antropomórficos diseñado para aplicarse en tareas de inspección y mantenimiento en entornos industriales de difícil acceso para operarios humanos. El robot consiste en una plataforma aérea multirrotor equipada con dos brazos antropomórficos ultraligeros, así como el sistema de control integrado de la plataforma y los brazos. Una de las principales características del manipulador es la flexibilidad mecánica proporcionada en todas las articulaciones, lo que aumenta la seguridad en las interacciones físicas con el entorno y la protección del propio robot. Para ello se ha introducido un compacto y simple mecanismo de transmisión por muelle entre el eje del servo y el enlace de salida. La estructura en aluminio de los brazos ha sido cuidadosamente diseñada de forma que los actuadores estén aislados frente a cargas radiales y axiales que los puedan dañar. El manipulador desarrollado ha sido validado a través de experimentos en base fija y en pruebas de vuelo en exteriores.*

**Palabras Clave:** manipulación aérea, manipulador bi-brazo, diseño antropomórfico, deflexión articular.

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la robótica, el campo de la manipulación aérea tiene por objetivo desarrollar sistemas aéreos no tripulados (UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*) equipados con uno o múltiples brazos robóticos que proporcionen cierta destreza para la realización de tareas en lugares de difícil acceso o alto riesgo para humanos. Considérese por ejemplo la inspección y reparación de grietas en palas de aerogeneradores mediante cámaras, la detección y reparación de fugas de líquido o gas en tuberías de la industria química, la inspección por contacto en puentes, así como el mantenimiento de torres de alta tensión. La solución convencional planteada en estos escenarios consiste en el transporte y despliegue de operarios montados en grúas o colgados de arneses para alcanzar el espacio de trabajo. Este tipo de tareas, aun siendo de

corta duración, conllevan riesgo para los trabajadores y pueden suponer un coste significativo para las empresas debido al número de recursos involucrados, especialmente si se deben realizar periódicamente.

La manipulación aérea es un área de investigación muy reciente que ha centrado la atención de diversos grupos de investigación y empresas internacionales, en cuyo nacimiento ha jugado un importante papel el proyecto ARCAS [3] financiado por la Comisión Europea. Actualmente, los proyectos AEROARMS [1], financiado también por la Comisión Europea, y el proyecto AEROMAIN, en los cuáles se encuadra este trabajo, siguen contribuyendo de forma notable al campo de la manipulación aérea. El objetivo de estos proyectos es el desarrollo de sistemas robóticos con capacidades de manipulación y percepción avanzadas para la inspección y mantenimiento en entornos industriales. Las plataformas utilizadas son de tipo helicóptero o multirrotor, éstas en sus distintas variantes: quadrotor, hexarotor u octotoror. En [9], se presenta la integración de un robot industrial de siete grados de libertad en un helicóptero autónomo, mientras que en [14] se describe un helicóptero con manipulador flexible para el agarre y transporte de objetos. Se han desarrollado varios prototipos de manipuladores aéreos basados en plataforma de tipo quadrotor, integrando brazos articulados de dos, tres, cinco o seis grados de libertad [8][7][5][6]. En [10] se propone un dispositivo de pocos grados de libertad para cerrar una válvula mediante manipulación dual, y en [19] se presentó por primera vez un manipulador bi-brazo de tamaño humano, antecedente directo del que se presenta en este artículo. Recientemente se han presentado algunos prototipos de manipuladores flexibles para su aplicación en robótica aérea [4]. En [18] se analiza la interacción de una articulación flexible en contacto con el entorno. En [16] se demuestra la aplicación de la flexibilidad mecánica de la articulación del codo para la estimación del peso de los objetos y para la detección y reacción frente a colisiones, mientras que en [17] se amplía el trabajo anterior a la estimación y control de par y fuerza de contacto y a la localización de obstáculos con baja energía de impacto. Desde un punto de vista teórico, el modelado y control [11] de un robot de base flotante equipado con uno o más manipuladores

robóticos [13] es un problema complejo debido al acoplamiento dinámico entre la plataforma aérea y el manipulador, y al carácter intrínsecamente inestable de los vehículos aéreos de tipo multirotor [12].

La principal aportación de este trabajo es presentar las características y experimentos de un manipulador aéreo equipado con dos brazos antropomórficos de cuatro grados de libertad diseñado para manipulación dual y desarrollado en el Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC) de la Universidad de Sevilla. Este robot es el primero de sus características desarrollado en el mundo. En la Figura 1 se muestra una imagen del manipulador realizando una operación de agarre con dos manos en vuelo en exteriores.



Figura 1: Manipulador aéreo bi-brazo realizando una operación de agarre en vuelo.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. La Sección 2 describe el manipulador aéreo de brazos antropomórficos, planteando en la Sección 3 el modelo cinemático y dinámico de los brazos de articulaciones flexibles. Los modos de operación implementados se detallan en la Sección 4. En la Sección 5 se presentan los resultados experimentales, y las conclusiones en la Sección 6.

## 2 MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROMÓRFICOS

El manipulador aéreo desarrollado se muestra en la Figura 1. La plataforma aérea es un hexarotor del fabricante Drone Tools equipado con un ordenador Intel NUC donde se ejecuta el programa de control de los brazos y el módulo de visión, una cámara ZED para el guiado visual de los brazos, un enlace radio en la banda de 5.8 GHz, y los brazos antropomórficos con articulaciones flexibles desarrollado en el Grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla. Este manipulador bi-brazo ultraligero ha sido diseñado específicamente para su uso en aplicaciones de manipulación aérea en exteriores. Se introduce aquí el término ultraligero para destacar la diferencia de peso de estos brazos (1.3 kg en total) con respecto a los manipuladores *lightweight* (~15 kg por brazo) utilizados en la industrial (KUKA, DLR).

Los brazos han sido diseñados siguiendo un enfoque bioinspirado, eligiendo una configuración cinemática antropomórfica de cuatro grados de libertad (tres de hombro y codo), siendo además de tamaño humano. Esto permite replicar de forma inmediata e intuitiva los movimientos de un operador humano en el robot. Los actuadores utilizados son los servos Herkulex del fabricante coreano Dongbu Robot, modelos DRS-0101, y DRS-0201, mientras que la estructura ha sido fabricada en aluminio a partir de secciones de perfil plano de diferentes espesores. La Figura 2 muestra el manipulador con más detalle. Una de las principales características del diseño es la flexibilidad mecánica de todas las articulaciones. Un mecanismo de doble muelle con palanca ha sido integrado entre el eje del servo y el enlace de salida de cada articulación. Este mecanismo de transmisión elástica permite estimar y controlar el esfuerzo de cada articulación midiendo la deflexión de los muelles, lo que resulta de especial interés durante la interacción física del manipulador aéreo con el entorno. La rotación relativa del enlace de salida con respecto al eje del servo, denominada aquí como deflexión, es posible gracias a una pareja de cojinetes esféricos del fabricante igus® fijados a la estructura de aluminio. Por otra parte, se impuso como condición de diseño que los ejes de las cuatro articulaciones de cortasen en un punto, de forma que la resolución de la cinemática se simplificase y fuese analítica. El efector final consiste en una herramienta simple de agarre con un micro-ruptor frontal para detectar el contacto físico con los objetos.

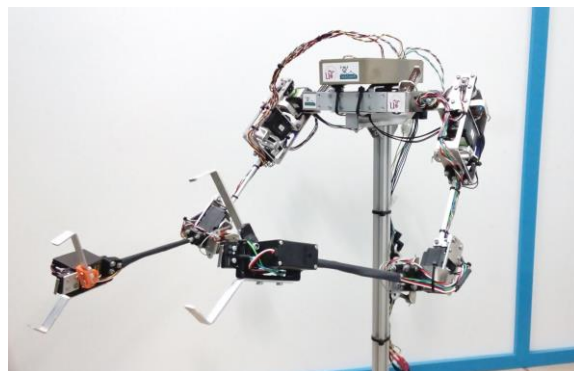


Figura 2: Manipulador antropomórfico bi-brazo de articulaciones flexibles.

Las especificaciones más destacadas del manipulador se recogen en la Tabla 1, mientras que en la Figura 3 se representa la arquitectura hardware/software. Aquí el componente principal es el gestor de tareas, el cuál implementa los modos de operación descritos en la Sección 4. La plataforma hexarotor proporciona una carga máxima de 2.5 kg, con un tiempo de vuelo en torno a 15 minutos llevando el manipulador bi-brazo.

Tabla 1: Especificaciones del manipulador bi-brazo

<b>Peso total</b>	1.3 [kg]
<b>Capacidad carga</b>	~0.2 [kg] cada brazo

<b>Nº articulaciones</b>	3 hombro + 1 codo
<b>Dimensiones</b>	Alcance máximo: 50 [cm] Separación brazos: 32 [cm]
<b>Rango de rotación</b>	$\pm 90$ , $[-10, 90]$ , $\pm 90$ , $\pm 120$ [ $^\circ$ ]
<b>Par de bloqueo</b>	24, 24, 12, 24 [kg·cm]
<b>Deflexión máxima</b>	$\pm 15$ [grados]

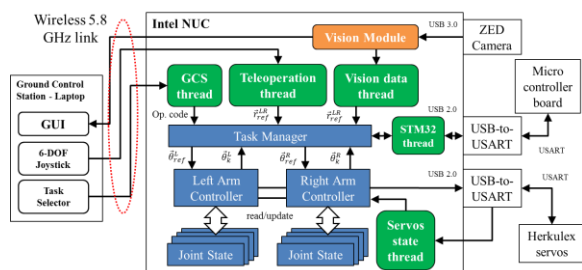


Figura 3: Arquitectura software y componentes del manipulador bi-brazo antropomórfico.

### 3 MODELO DEL MANIPULADOR

En esta sección se presenta el modelado geométrico y cinemático del manipulador antropomórfico bi-brazo, cubriendo también en parte el modelado dinámico. El modelo completo del manipulador aéreo está fuera del alcance de este trabajo.

La posición de una articulación flexible se determina a partir de tres variables relacionadas:

- La posición angular del eje del servo,  $\theta_j^i$
- La posición angular del enlace de salida,  $q_j^i$
- El ángulo de deflexión,  $\Delta\theta_j^i = q_j^i - \theta_j^i$

Se usará el superíndice  $i = \{1, 2\}$  para indicar el brazo y el subíndice  $j = \{1, 2, 3, 4\}$  para la articulación. El modelo cinemático se definirá a partir del ángulo  $q_j^i$ .

#### 3.1 MODELO GEOMÉTRICO

Los sistemas de coordenadas, variables articulares, el criterio de signo asociado, las longitudes y vectores de posición del manipulador bi-brazo antropomórfico se han representado gráficamente en la Figura 4. En este modelo,  $L_1$  y  $L_2$  son las longitudes de los enlaces del brazo y antebrazo, mientras que  $D$  representa la separación entre los brazos. Se denotará por  $q_1^i$ ,  $q_2^i$ ,  $q_3^i$  y  $q_4^i$  al ángulo de rotación de las articulaciones del brazo  $i$ -ésimo siguiendo el orden: flexión-extensión (pitch), aducción-abducción (roll), rotación medial-lateral (yaw) de hombro, y flexión-extensión (pitch) del codo. El sentido de giro positivo se obtiene por la regla de la mano derecha, de forma que el pulgar apunta en la dirección positiva del eje de rotación y los las yemas de dedos indican el sentido positivo de giro. Las ecuaciones del modelo cinemático se referirán al sistema de ejes  $\{X^i_0 Y^i_0 Z^i_0\}$  asociado a cada brazo. Por último, se denotará por  $r^i$ ,  $r^i_{ref}$  y  $e^i$  a la posición del efector final, la posición de referencia, y el error de posición, respectivamente.

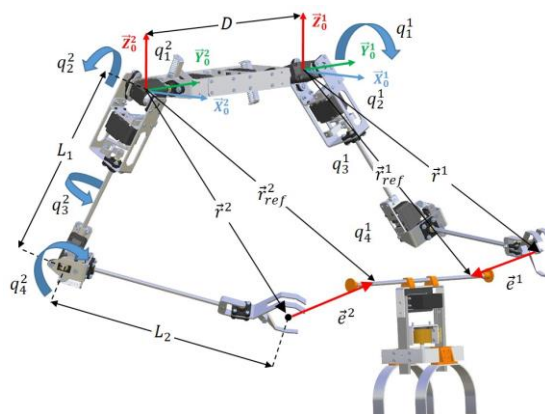


Figura 4: Modelo geométrico del manipulador de brazos antropomórficos. Vista renderizada.

#### 3.2 MODELO CINEMÁTICO

Para la presentación del modelo cinemático directo e inverso se tendrá en cuenta el hecho de que ambos brazos son idénticos en términos de configuración cinemática y tamaño, por lo que las ecuaciones se referirán a un sistema de coordenadas generalizado  $\{X^i_0 Y^i_0 Z^i_0\}$ .

##### 3.2.1. MODELO CINEMÁTICO DIRECTO

En el modelo cinemático directo, el espacio articular se transforma al espacio Cartesiano por medio de la función  $F_i: \mathcal{R}^4 \rightarrow \mathcal{R}^3$ . La posición del punto central de agarre  $r^i$  se calculará multiplicando las matrices de transformación de cada articulación,  ${}^{j-1}_j T(q_j^i)$ :

$$r^i(q^i) = F_i(q^i) = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \left( \prod_{j=1}^4 {}^{j-1}_j T(q_j^i) \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las matrices de transformación vienen dadas por:

$${}^0_1 T_1(q_1^i) = \begin{bmatrix} c_1^i & 0 & s_1^i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_1^i & 0 & c_1^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_2 T_2(q_2^i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2^i & -s_2^i & 0 \\ 0 & s_2^i & c_2^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3 T_3(q_3^i) = \begin{bmatrix} c_3^i & -s_3^i & 0 & 0 \\ s_3^i & c_3^i & 0 & 0 \\ 0 & s_2^i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3_4 T_4(q_4^i) = \begin{bmatrix} c_4^i & 0 & s_4^i & 0 \\ 0 & 1 & -s_4^i & 0 \\ -s_4^i & 0 & c_4^i & -L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde  $c_j^i = \cos(q_j^i)$ , y  $s_j^i = \sin(q_j^i)$ .

##### 3.2.2. MODELO CINEMÁTICO INVERSO

La restricción de diseño de los brazos haciendo que los ejes de rotación de las articulaciones se corten en un punto permite obtener solución analítica para el modelo cinemático inverso. Sin embargo, la función  $\Omega_i: \mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}^4$  que permite obtener el valor de las variables articulares a partir de una posición deseada del efector final, presenta infinitas soluciones debido al grado de libertad redundante. El enfoque adoptado en este trabajo es fijar el valor de la articulación roll



del hombro, de forma que  $q_2^i = \varphi_i$ . El ángulo de giro de esta articulación se ajustará según la operación del brazo, como se verá en la Sección 4. Una vez fijado este ángulo, es posible llegar a una ecuación trigonométrica para calcular el ángulo pitch del hombro (solución omitida por espacio):

$$x^i \cdot \sin(q_1^i) + z^i \cdot \cos(q_1^i) = w_i \quad (3)$$

$$w_i = \frac{L_2^2 - (L_1^2 + x_i^2 + z_i^2) + 2 \cdot L_1 \cdot y_i \cdot \sin(q_2^i)}{2 \cdot L_1 \cdot \cos(q_2^i)} \quad (4)$$

Seguidamente, el ángulo yaw del hombro; esto es, la rotación en torno al enlace del brazo, es calculada:

$$q_3^i = \text{atan2}(a^i, b^i) \quad (5)$$

$$a^i = x_i \cdot s_1^i \cdot s_2^i + y_i \cdot c_2^i + z_i \cdot c_1^i \cdot s_2^i \quad (6)$$

$$b^i = x_i \cdot c_1^i - z_i \cdot s_1^i \quad (7)$$

Por último, la posición articular del codo se obtiene a partir de la posición cartesiana del efector final y de las longitudes de los dos enlaces:

$$q_4^i = -\cos^{-1} \left( \sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}} \right) \quad (8)$$

### 3.3 MODELO DINÁMICO

Este apartado introduce brevemente el modelado de manipuladores robóticos de articulaciones flexibles. Para una explicación más en detalle se recomienda el artículo [2]. Como se indicó anteriormente, el ángulo de deflexión se define como la diferencia entre el ángulo del eje del servo y la posición angular del enlace de salida. El mecanismo de transmisión por muelle-palanca introducido en las articulaciones se asimilará a un amortiguador caracterizado por sus constantes de rigidez  $k_j^i$  y fricción  $d_j^i$ . Suponiendo que la deflexión es proporcional al par rotacional de la articulación, lo cuál es aceptable teniendo en cuenta la relación entre la compresión del muelle y la longitud de la palanca, se tiene que:

$$\tau_j^i = k_j^i \cdot \Delta\theta_j^i + d_j^i \cdot (\dot{q}_j^i - \dot{\theta}_j^i) \quad (9)$$

La derivación de las ecuaciones del modelo dinámico parte del Lagrangiano y de la ecuación generalizada para la fuerza y los pares, donde además de la energía cinética de los actuadores y de los enlaces de salida, se tiene en cuenta la energía potencial elástica de los muelles. Al final, es posible llegar a la formulación matricial típica con los términos de inercia, Coriolis y gravedad, solo que a diferencia de un manipulador de articulaciones rígidas, el modelo se descompone en

dos partes: una ecuación para la dinámica del motor y otra para la dinámica de los enlaces:

$$\mathbf{B}_i(\boldsymbol{\theta}^i)\ddot{\boldsymbol{\theta}}^i + \boldsymbol{\tau}^i = \boldsymbol{\tau}_m^i - \boldsymbol{\tau}_f^i \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{q}^i)\ddot{\mathbf{q}}^i + \mathbf{C}_i(\mathbf{q}^i, \dot{\mathbf{q}}^i) + \mathbf{G}_i(\mathbf{q}^i) = \boldsymbol{\tau}^i + \boldsymbol{\tau}_{ext}^i \quad (11)$$

En las expresiones anteriores,  $\mathbf{B}_i$  y  $\mathbf{M}_i$  denotan las matrices generalizadas de inercia de los ejes de los servos y de los enlaces del brazo, respectivamente,  $\mathbf{C}_i$  es el vector de par asociado a fuerzas centrífugas y de Coriolis, mientras que  $\mathbf{G}_i$  es el par gravitatorio. El par generado por el motor,  $\boldsymbol{\tau}_m^i$ , se gasta en compensar la fricción de la reductora,  $\boldsymbol{\tau}_f^i$ , en acelerar el eje de salida del servo y en la transmisión de movimiento a los enlaces a través de los muelles,  $\boldsymbol{\tau}^i$ . Por último,  $\boldsymbol{\tau}_{ext}^i$  representa el par de las articulaciones debido a fuerzas externas, típicamente fuerzas de contacto.

## 4 MODOS DE OPERACIÓN DEL MANIPULADOR

Esta sección describe algunas operaciones básicas que el manipulador implementa para poder llevar a cabo diferentes tareas de manipulación aérea que involucren el agarre o bien la instalación de sensores, instrumentos o cualquier otro dispositivo.

### 4.1 POSICIONES DE OPERACIÓN

El movimiento de los brazos robóticos instalados en la base de la plataforma aérea se verá restringido por el tren de aterrizaje y por obstáculos en el entorno. En primer lugar, durante las operaciones de despegue y aterrizaje, los brazos deberán estar en una posición tal que, tanto el codo como el efector final, queden por encima del plano del suelo, es decir, por encima del tren de aterrizaje. Atendiendo a la Figura 5, la forma más inmediata de elevar los brazos para alcanzar esta configuración es mediante la rotación de la segunda articulación del hombro (ángulo roll), y doblando el codo para contraer el antebrazo:

$$\mathbf{q}_{despegue}^{1,2} = \left[ 0 \quad \pm \frac{\pi}{2} \quad 0 \quad -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (12)$$

Puesto que la operación de aterrizaje resulta más crítica que la de despegue en términos de seguridad, es conveniente definir una posición de referencia de los brazos que permita pasar de forma rápida y fiable de la postura habitual de manipulación a la posición de despegue. Esta posición de operación, mostrada en la Figura 5, se ha definido para evitar que los brazos choquen entre ellos o con el tren de aterrizaje durante el movimiento de recogida. La posición articular es:

$$\mathbf{q}_{operación}^{1,2} = \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (13)$$



Figura 5: Posición de despegue/aterrizaje (izquierda) y posición de operación (derecha).

## 4.2 OPERACIÓN MANUAL

En ciertas aplicaciones será necesario que el operador del manipulador pueda guiar manualmente el efector final, por ejemplo para agarrar algún objeto o para interactuar con un dispositivo o sensor. Por ello, se ha desarrollado un modo de operación que permite desplazar el efector final de ambos brazos en el espacio cartesiano de forma simultánea utilizando un único joystick. El esquema de control implementado es el que se muestra en la Figura 6. El ratón de seis grados de libertad Space Navigator de 3DConnexion sirve de interfaz de control para el usuario, generando a su salida la referencia de velocidad cartesiana que, al ser integrada, pasa a ser una referencia incremental de posición. A ésta se le añade la posición actual del efector final calculada a partir del modelo cinemático directo descrito en la Sección 3.2. Las referencias de posición cartesiana se transforman seguidamente al espacio articular aplicando el modelo cinemático inverso. Los controladores de bajo nivel de ambos brazos se encargan de generar una trayectoria suave aprovechando el perfil de velocidad trapezoidal que cada servo genera internamente. Los tres grados de libertad de orientación del ratón permiten ajustar la posición relativa de un brazo respecto a otro. Esto es, lo que se controla es la orientación del segmento imaginario que une el efector final de ambos brazos, rotando entorno al punto medio de dicho segmento.

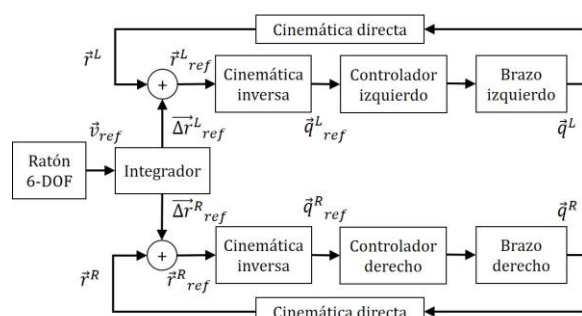


Figura 6: Esquema de guiado manual del efector final izquierdo y derecho con un único joystick de 6-DOF.

## 4.3 GUIADO VISUAL

El agarre de un objeto en vuelo realizado de forma manual por un operador en tierra puede ser inviable si la plataforma aérea se ve afectada por oscilaciones debido al viento o a otros efectos aerodinámicos y de

control. Téngase en cuenta que las operaciones de manipulación sobre base móvil requieren de un cierto nivel de coordinación, destreza y velocidad que los humanos no pueden alcanzar a no ser que se tengan un entrenamiento intensivo especializado. Por este motivo, se ha desarrollado en este trabajo un sistema de guiado visual para el agarre de un objeto con asas. El algoritmo de visión utilizado [15] proporciona los puntos de agarre 3D relativos a los ejes de la cámara, transformados luego al sistema de ejes de cada brazo. El método de guiado consiste en aproximar el efector final al respectivo punto de agarre con velocidad constante y siguiendo la dirección del vector de error, definido como:

$$e^i = r_{obj}^i - r^i \quad (14)$$

Aquí  $r^i$  y  $r_{obj}^i$  son la posición actual y objetivo dada por visión del efector final del  $i$ -ésimo brazo. En cada iteración del controlador, la referencia de posición se calculará de la siguiente forma:

$$r_{ref}^i = r^i + v \cdot T \cdot \frac{e^i}{\|e^i\|} + r_G^i \quad (15)$$

En la ecuación anterior,  $v$  es la velocidad deseada de aproximación al punto de agarre,  $T$  es el período de control, mientras que el término  $r_G^i$  compensa las deflexiones estáticas por gravedad. El esquema de control implementado es muy similar al descrito en la Figura 6: las referencias de posición cartesianas son transformadas a referencias articulares aplicando el modelo cinemático inverso. Luego, el controlador de cada brazo genera los comandos de movimiento que son enviados a cada uno de los servos.

## 4.4 AGARRE POR CONTACTO MECÁNICO

La fiabilidad de una operación de agarre puede ser incrementada incorporando mecanismos de detección de contacto, de forma que el efector final se cierre al producirse un cambio de nivel en un micro-ruptor. En la Figura 2 se puede ver este mecanismo instalado en la parte delantera del servo de la mano. No obstante, este modo de operación debe complementarse con el modo manual para abrir el efector final cuando sea conveniente.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 GUIADO VISUAL Y AGARRE

El método de agarre descrito en la Sección 4.3 se ha evaluado experimentalmente en base fija antes de ser aplicado en vuelo (ver Sección 5.4). El objeto a coger era una caja de plástico con una barra circular de 8 mm de sección y 35 cm de largo instalada sobre ella a modo de asa. Los extremos de la barra se cerraron

con dos piezas cuadradas de plástico para evitar el deslizamiento. Se instaló una cámara ZED sobre la estructura de los hombros orientada 45 grados hacia abajo, proporcionando un campo de visión horizontal de 120 grados. El algoritmo de visión [15] utiliza un modelo del objeto basado en características visuales aprendido previamente para detectarlo y localizarlo. Los puntos de agarre sobre las asas se obtienen a partir del sistema de referencia asociado a la caja.

La trayectoria seguida por cada uno de los brazos, así como la referencia de control y la posición objetivo dada por el módulo de visión durante el experimento de guiado visual y agarre se representa en la Figura 7. Los brazos parten de la posición de operación dada por la ecuación (13), alcanzando el objetivo situado enfrente en tres segundos. Se impuso una velocidad deseada de  $v = 0.2$  m/s, siendo el período de control de  $T = 0.1$  segundos. Aunque la tasa de control pueda parecer baja, hay que tener en cuenta que se trata de una referencia de posición en un sistema mecánico, y que el controlador interno de cada servo se ejecuta a 100 Hz aproximadamente.

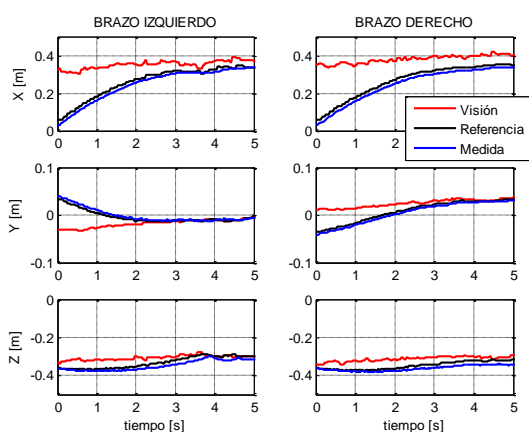


Figura 7: Trayectoria cartesiana del efector final en el experimento de agarre con realimentación visual.

El cierre del efector final en este experimento se hizo de forma manual utilizando los botones del ratón de seis grados de libertad Space Navigator, conmutando de abierto a cerrado con cada pulsación.

## 5.2 RESPUESTA A IMPACTO DE LAS ARTICULACIONES FLEXIBLES

El objetivo de este experimento es mostrar el efecto de las articulaciones flexibles cuando el efector final sufre el impacto de un objeto de 62 gramos de peso al caer desde una altura de 57 cm, lo que corresponde a una energía potencial de 0.35 J. En la Figura 8 se ha representado la aceleración del efector final, medida con un acelerómetro instalado en la base del mismo, junto con la medida de deflexión de la articulación de codo y hombro dada por los potenciómetros. Como

se ve, los muelles actúan como filtro paso-baja, de forma que las componentes de alta frecuencia de la aceleración no son transmitidas al eje del servo, lo que resulta conveniente para proteger al actuador.

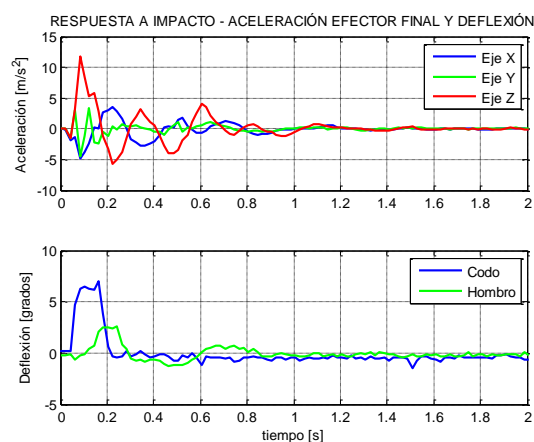


Figura 8: Respuesta a impacto del brazo izquierdo: aceleración del efector final y deflexión articular.

## 5.3 GUIADO MANUAL CON AGARRE EN CADENA CINEMÁTICA CERRADA

Este experimento describe una aplicación interesante de la flexibilidad articular mecánica en combinación con el guiado visual en condiciones de agarre. Nótese que si el punto de agarre del objeto coincide con la posición del propio efector final, el vector de error de la ecuación (14) representaría la deflexión mecánica en el espacio cartesiano del manipulador. Esto exige que la posición  $r^i$  se calcule teniendo en cuenta únicamente las posiciones articulares de los servos sin considerar la deflexión articular; es decir, que se trata de un manipulador rígido equivalente.

Cuando el modo de operación de guiado visual está activo, el efecto que se produce es el de un control de impedancia en el espacio cartesiano, ya que el objetivo de control es anular la deflexión (fuerza) mecánica de los muelles del manipulador. En la Figura 9 se puede ver la trayectoria del efector final del brazo izquierdo cuando el objeto agarrado es guiado manualmente, primero de arriba abajo (eje Z), luego de izquierda a derecha (eje Y), con pequeños desplazamientos en el eje X. Lo que ocurre es lo siguiente. El manipulador se encuentra inicialmente agarrando el objeto sin que se aplique ninguna fuerza externa sobre él, por lo que  $e^i = 0$  y la deflexión será nula. En un momento dado, el objeto es empujado, lo causa la deflexión instantánea de las articulaciones. El módulo de visión mide un desplazamiento del punto de agarre (el cuál coincide con el efector final) con respecto al instante anterior, por lo que el vector de error  $e^i$  deja de ser nulo. Entonces el método de guiado descrito en la Sección 4.3 actúa sobre los brazos para corregir esta desviación, haciendo que la

deflexión tiende a cero y facilitando el guiado de los brazos mientras agarran el objeto.

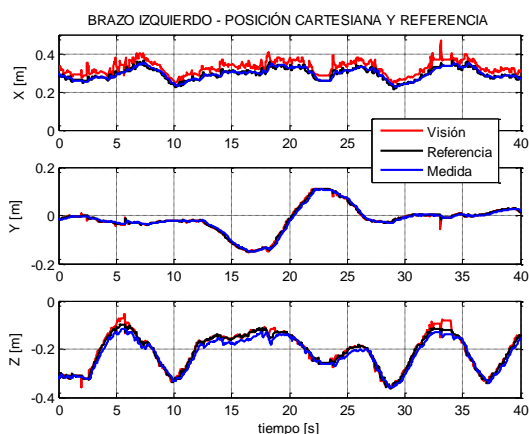


Figura 9: Posición del efector final izquierdo (azul) y del punto de agarre dado por visión (rojo). El brazo sigue el objeto agarrado cuando es desplazado.

#### 5.4 EXPERIMENTOS EN VUELO

El manipulador aéreo de brazos antropomórficos fue evaluado en un experimento de vuelo en exteriores cuyo objetivo era coger un instrumento de inspección instalado sobre una tubería de PVC controlando los dos brazos con el algoritmo de guiado visual descrito en la Sección 5.1. Una vez agarrado, el instrumento se lleva hasta la zona de recogida donde se suelta en una caja, operando los brazos manualmente con el método presentado en la Sección 4.2. Las fases del experimento se han representado en la Figura 10 y en la Figura 11. El manipulador parte de la posición de despegue con los brazos recogidos por encima del suelo en la configuración dada por la Ecuación (12). Una vez la plataforma entra en el espacio de trabajo, los brazos pasan a la posición de operación dada por la Ecuación (13). Seguidamente se activa el modo de guiado visual de los brazos mientras el piloto del UAV acerca la plataforma a la tubería sobre la que está instalado el objeto. Una vez los brazos consiguen agarrar el objeto por sus asas, por seguridad los brazos se llevan de nuevo a la posición de operación. El UAV se guía entonces hacia la zona en la que se depositará el instrumento, operando los brazos con el ratón. Por razones de seguridad, en los experimentos se dispuso una cuerda pasante por polea por encima de la plataforma aérea para que al tirar de ella se evitase el impacto en caso de fallo, sin que afectase de forma significativa a la dinámica del sistema.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la viabilidad de los robots aéreos con dos brazos robóticos aplicados a la manipulación dual en vuelo, presentando un sistema

compuesto por una plataforma hexarotor equipada con dos brazos antropomórficos de articulaciones flexibles. Las principales características de los brazos son el bajo peso (1.3 kg), la capacidad de deflexión articular y la robustez mecánica. El artículo cubre el modelado cinemático, introduciendo la dinámica del manipulador de articulaciones flexibles, así como los modos de operación de los brazos. Los experimentos realizados demuestran que la deflexión mecánica no sólo aumenta la seguridad en las interacciones físicas con el entorno, sino que amplía las capacidades del manipulador, permitiendo la estimación y control de fuerzas de contacto o la detección de colisiones.

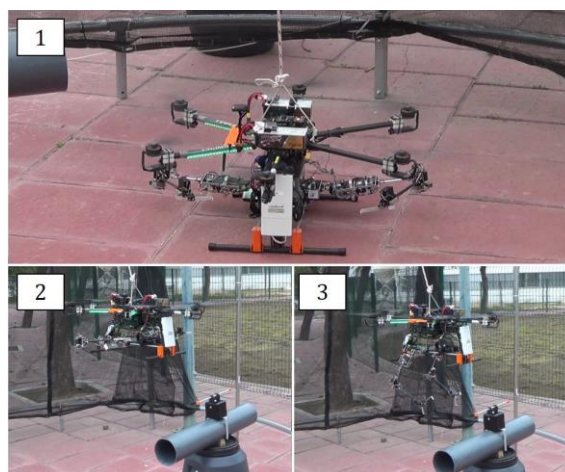


Figura 10: Despegue del manipulador aéreo (1) y transición de posición recogida (2) a operación (3).

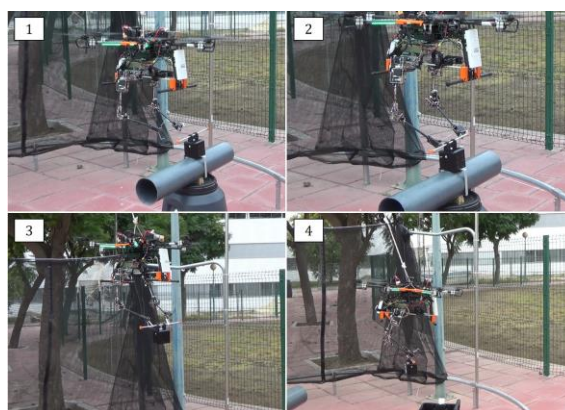


Figura 11: Experimento de agarre: aproximación (1), agarre (2), recuperación (4) y transporte (4).

#### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto Español MINECO Retos AEROMAIN (DPI2014-5983-C2-1-R) así como por el proyecto AEROARMS (AERial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance), número de contrato 644271. La tesis de Alejandro Suárez está financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través del programa FPU.

## Referencias

- [1] AEROARMS Project: AERial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities.
- [2] Albu-Schäffer, A., Ott, C., & Herzinger, G. (2007). A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The International Journal of Robotics Research*, 26(1), 23-39.
- [3] ARCAS Project: Aerial Robotics Cooperative Assembly System.
- [4] Bartelds, T., Capra, A., Hamaza, S., Stramigioli, S., & Fumagalli, M. (2016). Compliant aerial manipulators: Toward a new generation of aerial robotic workers. *IEEE RAL*, 1(1), 477-483.
- [5] Bellicoso, C. D., Buonocore, L. R., Lippiello, V., & Siciliano, B. (2015, June). Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation. In *Control and Automation (MED)*, 2015 23th Mediterranean Conference on (pp. 853-858). IE.
- [6] Cano, R., Pérez, C., Pruano, F., Ollero, A., & Heredia, G. (2013). Mechanical design of a 6-DOF aerial manipulator for assembling bar structures using UAVs. In *2nd RED-UAS 2013 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*.
- [7] Jimenez-Cano, A. E., Martin, J., Heredia, G., Ollero, A., & Cano, R. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on (pp. 4916-4921).
- [8] Kim, S., Choi, S., & Kim, H. J. Aerial manipulation using a quadrotor with a two dof robotic arm. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 4990-4995).
- [9] Kondak, K., Huber, F., Schwarzbach, M., Laiacker, M., Sommer, D., Bejar, M., & Ollero, A. Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 DoF industrial manipulator. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2014 IEEE Int. Conf on (pp. 2107-2112).
- [10] Korpela, C., Orsag, M., & Oh, P.. Towards valve turning using a dual-arm aerial manipulator. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3411-3416).
- [11] Mellinger, D., Lindsey, Q., Shomin, M., & Kumar, V. (2011, September). Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011 IEEE/RSJ Int. Conference on (pp. 2668-2673). IEEE.
- [12] Orsag, M., Korpela, C., & Oh, P. (2013). Modeling and control of MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1-14.
- [13] Papadopoulos, E., & Moosavian, S. A. A. (1994). Dynamics and control of space free-flyers with multiple manipulators. *Advanced robotics*, 9(6), 603-624.
- [14] Pounds, P. E., Bersak, D. R., & Dollar, A. M. (2011, May). The Yale aerial manipulator: grasping in flight. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 International Conference on (pp. 2974-2975). IEEE.
- [15] Ramon Soria, P., Arrue, B. C., & Ollero, A. (2017). Detection, Location and Grasping Objects Using a Stereo Sensor on UAV in Outdoor Environments. *Sensors*, 17(1), 103.
- [16] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. (2015) Lightweight compliant arm for aerial manipulation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ Int. Conference on (pp. 1627-1632).
- [17] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. Lightweight compliant arm with compliant finger for aerial manipulation and grasping. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016 IEEE/RSJ International Conference on.
- [18] Yüksel, B., Mahboubi, S., Secchi, C., Bühlhoff, H. H., & Franchi, A. (2015, May). Design, identification and experimental testing of a light-weight flexible-joint arm for aerial physical interaction. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2015 IEEE Int. Conf. on (pp. 870-876). IEEE.
- [19] Youtube: AEROARMS - Entwicklung des ersten Flug-Roboters | Automatica 2016 .