

# 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
MiguelÁngel 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>	
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 MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO

I. Rivas-Blanco, C. López-Casado, C. Pérez-del-Pulgar, F. García-Vacas, E. Bauzano, V.F. Muñoz  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, mclopezc@uma.es

J. C. Fraile

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, jcfraile@eii.uva.es

## Resumen

*Este artículo describe el diseño mecánico y la arquitectura cognitiva de un asistente robótico camarógrafo que combina las ventajas de los dispositivos intra-abdominales y la navegación autónoma. El asistente robótico está compuesto por un robot cámara intra-abdominal con acople magnético y con dos grados de libertad. La inteligencia del robot se basa en una arquitectura cognitiva basada en memoria a largo plazo para almacenar el conocimiento del robot y capacidades de aprendizaje para mejorar el comportamiento del mismo. La estrategia de navegación del robot cámara combina un control reactivo basado en el seguimiento del instrumental quirúrgico; junto con un control proactivo basado en comportamientos predefinidos dependientes del estado actual de la tarea. Tanto la arquitectura cognitiva como el diseño mecánico han sido validados con una serie de experimentos que se detallan en el artículo. Previamente, todo el diseño e implementación son descritos.*

**Palabras Clave:** Mecatrónica, robótica médica, robótica cognitiva, control robótico, navegación robótica.

## 1 INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva está globalmente aceptada y proporciona una serie de beneficios para los pacientes. Aun así, presenta una serie de limitaciones con respecto a la cirugía abierta convencional. Una de las principales limitaciones es la necesidad de un endoscopio que permita visualizar el campo de visión de la intervención. El movimiento del endoscopio está restringido por el puerto de acceso del mismo, el cual sólo proporciona cuatro grados de libertad (DoFs) de movimiento: dos rotacionales alrededor del punto de entrada, otro rotacional alrededor del eje longitudinal del endoscopio y por último uno translacional a lo largo de dicho eje. Esta limitación de movimiento se

traduce directamente en una limitación en el campo de visión, ya que aparecen muchas zonas ocultas a las que el endoscopio no puede acceder. Por otro lado, la laparoscopia convencional necesita de un asistente dedicado únicamente a la sujeción y movimiento del endoscopio. La fatiga y el estrés, especialmente en intervenciones de larga duración, pueden afectar a la calidad y a la estabilidad de la imagen.

Una posible solución para aumentar el campo de visión durante intervenciones laparoscópicas es el uso de endoscopios flexibles. Estos dispositivos disponen de DoFs adicionales, pero son complejos de usar. La falta de rigidez afecta la estabilidad de la imagen y la existencia de horizontes visuales fijos hacen que el cirujano se tenga que adaptar a vistas inclinadas o incluso invertidas [1]. Otra opción es el uso de dispositivos intra-abdominales. Estos dispositivos son introducidos en la cavidad abdominal a través de orificios naturales o a través de incisiones abiertas para introducir el instrumental médico. Diferentes mecanismos de fijación a la pared abdominal han sido explorados: sutura [2], adosada a la aguja [3]... pero sólo el acople magnético [4] permite el movimiento de los dispositivos. A través de un agarre magnético externo, la cámara puede ser desplazada por la cavidad abdominal accediendo a zonas inalcanzables por los endoscopios tradicionales [5]. La viabilidad de este tipo de dispositivos magnéticos ha sido validada en experiencias de clínica humana [6] y se ha demostrado que esta técnica proporciona una vista mayor que la obtenida con dispositivos fijos [7]. Algunos autores han diseñado dispositivos con dos DoFs (rotación e inclinación) que se activan por medio de motores internos [8]. Aunque estas soluciones aumentan el campo de visión en comparación con los endoscopios tradicionales, este tipo de dispositivos todavía necesitan un asistente para manejar el agarre externo.

Con respecto a la navegación de la cámara, existen robots quirúrgicos específicamente diseñados para sostener los endoscopios. Éstos mejoran la eficiencia y reducen el número de personal necesario [9]. Normalmente, los movimientos de la cámara están

restringidos a un número de comandos, tales como derecha, izquierda... indicando la dirección de movimiento de la cámara. Estas instrucciones deben ser comandadas por el cirujano, haciendo que distraiga su atención de la tarea quirúrgica que desempeña. Por el contrario, estrategias de auto guiado de la cámara reducen la carga de trabajo del cirujano, ya que sólo debe atender a las tareas de cirugía propiamente dichas. Las estrategias de movimiento automáticas se dividen en dos: seguimiento de instrumental y navegación basada en el flujo de trabajo del protocolo quirúrgico.

El seguimiento del instrumental es una técnica que se basa en el seguimiento de la punta del instrumental quirúrgico [10]. Muchas de estas técnicas se fundamentan en procesado de imágenes, generalmente utilizando marcas de color [11]. Esta técnica tiene la ventaja de que no se necesitan sensores adicionales, pero el seguimiento sólo es posible cuando las marcas están visibles. Hay autores que mejoran el guiado de la cámara prediciendo el movimiento del instrumental utilizando modelos de Markov [12]. Sin embargo, todas las estrategias siguen reglas estáticas tales como seguir un instrumento, o el punto medio de dos instrumentos...[13].

Algunos autores utilizan clasificadores probabilísticos para modelar las tareas quirúrgicas [14]. En estos casos, la estrategia de guiado depende del estado actual de la tarea [15]. En trabajos previos de nuestro grupo [16], se propuso una mejora del tradicional seguimiento del instrumental definiendo diferentes puntos de seguimiento dependiendo del estado actual de la tarea quirúrgica. Además, este trabajo incluía un mecanismo de aprendizaje basado en las preferencias de los distintos cirujanos para mejorar el comportamiento del robot. Aunque este método tiene en cuenta el flujo de trabajo de la intervención, la cámara permanecía estática en cada estado del mismo. Aunque todos los métodos proporcionan un movimiento autónomo, carecen de inteligencia y conocimiento como para ser considerados autónomos [17].

Este artículo propone un concepto novedoso de asistente robótico camarógrafo, que combina las ventajas de los dispositivos intra-abdominales y los sistemas de navegación autónomos. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. El apartado 2 detalla el diseño mecánico del asistente robótico. En el apartado 3 se explica la arquitectura cognitiva que gestiona el movimiento automático del mismo. El apartado 4 incluye los experimentos y resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones están en el apartado 5.

## 2 ROBOT CÁMARA

Este apartado describe el diseño mecánico del asistente robótico camarógrafo y el modelo geométrico de la tarea.

### 2.1 DISEÑO MECÁNICO

La Figura 1 muestra el escenario de trabajo del asistente robótico. Éste está dividido en dos partes: un brazo robótico externo y un robot cámara interno. Ambos dispositivos están unidos a través de un agarre magnético que se encuentra ubicado en el efector final del brazo robótico. El robot cámara se introduce en la cavidad abdominal a través de una de las incisiones abiertas para introducir el instrumental médico. Una vez dentro de la cavidad abdominal, se sujeta a ésta a través de un acople magnético con el agarre externo. Este asistente robótico tiene seis DoFs: dos desplazamientos a través de la pared abdominal ( $d_x$  y  $d_y$ ), una rotación ( $\varphi$ ) generada por el robot externo; rotación e inclinación internas ( $\alpha$  and  $\beta$ ) y zoom digital que simula el movimiento entrante-saliente de los endoscopios tradicionales. El desplazamiento a lo largo de la pared abdominal permite acceder a cualquier área dentro de la cavidad abdominal, mientras que la rotación externa controla el horizonte de la imagen. Adicionalmente, la rotación e inclinación internas permiten ver el área de operación desde distintas perspectivas. Hecho bastante útil en imágenes 2D donde la percepción de profundidad se pierde.

El diseño mecánico del robot cámara se muestra en la Figura 2. El robot tiene las siguientes dimensiones: 30 mm  $\times$  27 mm  $\times$  88 mm, mientras que los imanes utilizados son de 20 mm de diámetro y 5 mm de altura. La cámara (modelo MO-F3506LSC-3T, Misumi Electronics Corp., Taiwan), de 8 mm de diámetro y 10.5 mm de longitud, tiene una resolución de 400 líneas TV, 50 fps y una distancia focal entre 5-10 cm, adecuada para proporcionar imágenes de alta resolución en un ambiente laparoscópico. La cámara incluye seis LEDs blancos, por lo que no se necesita iluminación adicional.

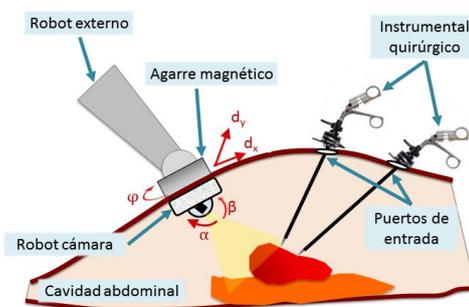


Figura 1. Escenario de trabajo.

El sistema de cableado que actúa sobre las rotaciones e inclinaciones internas puede verse en la Figura 3. La parte accionada está formada por dos mecanismos concéntricos (rotación e inclinación) que mueven la cámara en las direcciones indicadas por  $\alpha$  y  $\beta$ . La parte motora está compuesta por dos motores (motor 1 y 2) que se encargan de la actuación del sistema. Ésta se basa en la transmisión de movimiento entre las dos poleas de la parte motora (poleas 1 y 2) y la dos de la parte accionada (poleas 3 y 4). En la parte accionada, unos cables (rojo y azul) están sujetos a la polea del mecanismo de rotación (polea 3) y otros (verde y naranja) están sujetos a la polea del mecanismo de inclinación (polea 4). En cuanto a la parte motora, los cables rojo y azul están conectados a la polea del motor 1 (polea 1) y los verde y naranja a la polea del motor 2 (polea 2). Esta conexión hace que una rotación incremental,  $\theta_1$ , del motor 1 se transmita como una rotación incremental,  $\alpha$ , en el mecanismo de rotación. Por otro lado, una rotación incremental,  $\theta_2$ , del motor 2 se transite como una rotación incremental,  $\beta$ , en el mecanismo de inclinación. Suponiendo que no hay desplazamiento en los cables y que la anchura de los mismos es despreciable, las ecuaciones de la transmisión de movimiento pueden escribirse como:

$$\alpha = \frac{D_1}{D_3} \theta_1 \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D_2}{D_4} \theta_2 \quad (2)$$

donde  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  y  $D_4$  son los diámetros de las poleas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

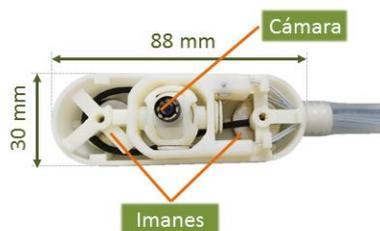


Figura 2. Vista desde arriba del robot cámara.

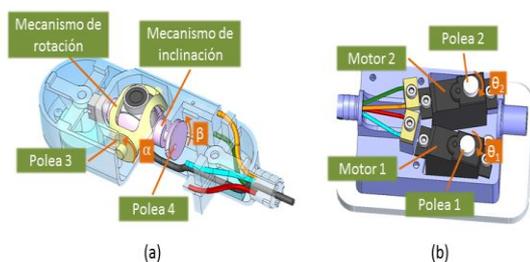


Figura 3. Sistema de cableado: (a) Parte accionada; (b) parte motora.

## 2.2 MODELO GEOMÉTRICO DE LA TAREA

El modelo geométrico de la tarea aparece en la Figura 4, donde el sistema de referencia global está indicado como  $\{0\}$  y el sistema de referencia de la imagen 2D es el  $\{I\}$ . El origen del sistema de coordenadas  $\{0\}$  está ubicado en el punto central de contacto del robot cámara con la pared abdominal. En cuanto al sistema de coordenadas  $\{I\}$ , su origen está ubicado en el centro de la imagen. El ancho,  $w$ , y alto de la imagen,  $h$ , dependen de la resolución. Los desplazamientos  $d_x$  y  $d_y$  originan movimientos de la imagen en los ejes  $X_0$  e  $Y_0$ , respectivamente. Por otro lado, la rotación externa,  $\varphi$ , origina una rotación de la imagen en el eje  $Z_0$ . El zoom de la imagen se calcula digitalmente a través de la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_z \\ h_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\text{zoom}} \begin{pmatrix} w \\ h \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde  $w_z$  y  $h_z$  son el ancho y alto de la imagen para un valor determinado de zoom.

## 3 ARQUITECTURA CONGNITIVA DEL ROBOT CÁMARA

La arquitectura cognitiva (Figura 5) del robot cámara implementa la base del conocimiento del robot y las funciones de razonamiento para inferir la vista óptica en cada estado de la intervención. Para ello se basa en la información del escenario proporcionada a través del sistema de percepción. Una vez calculada la vista óptica, informa de la posición adecuada del robot cámara al sistema encargado de su movimiento. El módulo de interacción Hombre-Máquina permite la comunicación entre el robot cámara y el cirujano. Esta interacción se realiza a través de un interfaz hombre-máquina (HMI) que directamente comanda al robot un movimiento en concreto; y a través de un sistema de reconocimiento de gestos que permite inferir en qué estado de la tarea se encuentra la intervención.

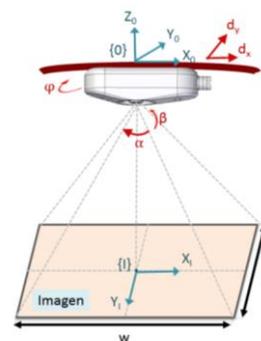


Figura 4. Modelo geométrico de la tarea.

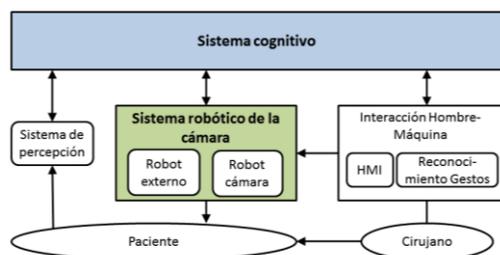


Figura 5. Arquitectura cognitiva.

Este sistema cognitivo combina un comportamiento reactivo basado en el seguimiento del instrumental junto con un comportamiento proactivo dependiente del flujo de trabajo de la intervención. De esta manera el asistente robótico es capaz de acomodar la vista de la cámara al estado actual de la intervención, pero con flexibilidad suficiente como para adaptar el comportamiento a situaciones no planificadas.

El sistema de reconocimiento de gestos ha sido analizado en trabajos previos [18][19], de ahí que quede fuera del ámbito de este trabajo. Para los experimentos, el sistema de percepción se ha reducido a un sistema de visión que monitoriza la posición de unas marcas.

### 3.1 SISTEMA COGNITIVO

Como se muestra en la Figura 6, el sistema cognitivo del robot está compuesto por dos tipos de memoria. La memoria a largo plazo que contiene el conocimiento global del sistema y en la que se codifica la información durante largos períodos de tiempo; y la memoria de trabajo, en la que se combinan la información del sistema cognitivo y la información de la memoria a largo plazo para presentar la situación actual.

La memoria a largo plazo se divide a su vez en memoria semántica y procedural. La primera almacena el conocimiento actual de la situación y se modela como una base de datos. Para el escenario de este trabajo, la memoria semántica incluirá información para el reconocimiento de los objetos a través de algoritmos de visión de segmentación. Es decir, se almacenarán los códigos HSV de las marcas de color asociadas a cada uno de los objetos que es necesario ubicar dentro del escenario, principalmente el instrumental quirúrgico. También, se incluirá información sobre las distintas fases en las que se divide el protocolo quirúrgico. Por cada protocolo quirúrgico a realizar se debe almacenar cada una de las fases que lo componen. Por último, se almacena también información sobre el punto de vista de la cámara para cada una de las fases del protocolo definidas anteriormente si se siguiera un comportamiento proactivo puro.

Por otro lado, la memoria procedural está asociada con el conocimiento no consciente. En este tipo de memoria se codifican las estrategias de navegación de la cámara. Éstas están divididas en dos grupos: seguimiento de instrumental y navegación basada en la fase del protocolo quirúrgico. La primera estrategia se considera un comportamiento reactivo; mientras que la segunda se considera proactivo. Ambas estrategias se basan en acciones pre-programadas rígidas y no contienen inteligencia ni conocimiento para ser consideradas estrategias de navegación autónomas. Mientras que el comportamiento reactivo tiene flexibilidad suficiente para seguir al instrumental médico, no posee la capacidad de adaptar el punto de vista dependiendo de la tarea que se está haciendo en el momento. Por el contrario, el comportamiento proactivo tiene la flexibilidad de ofrecer diferentes puntos de vista dependiendo del estado del protocolo, pero este comportamiento no puede ser modificado durante la duración de dicho estado. Por lo tanto, una estrategia que combine ambos comportamientos podría ofrecer un comportamiento proactivo sin perder las ventajas del seguimiento reactivo del instrumental.

Esta estrategia combinada se basa en calcular el foco de atención de la imagen ( $P_{FOA}$ ) como una composición ponderada de las contribuciones de un comportamiento y otro:

$$P_{FOA} = K_r \cdot P_{INSTRUMENTAL} + K_p \cdot P_{ESTADO} \quad (4)$$

Donde  $K_r$ ,  $K_p$  son los pesos asociados al comportamiento reactivo y proactivo, respectivamente. Estos pesos deben cumplir que  $K_r, K_p \in [0,1] / K_r + K_p = 1$ . El valor de estos pesos será aprendido a través del algoritmo de refuerzo que será descrito en el siguiente apartado.

En cuanto a la contribución reactiva, la posición considerada para el seguimiento de las dos herramientas utilizadas en el escenario (Figura 1) se calcula de la siguiente manera:

$$P_{INSTRUMENTAL} = K_{TOOLS} \begin{pmatrix} P_D \\ P_I \end{pmatrix} \quad (5)$$

Siendo  $K_{TOOLS} = (\delta_D \delta_I) / (\delta_D + \delta_I)$ , donde  $\delta_D$  y  $\delta_I$  son variables binarias que son verdaderas cuando la herramienta derecha y la izquierda, respectivamente, están en movimiento. Las posiciones de cada una de las herramientas son obtenidas a través de marcadores en las mismas y utilizando algoritmos de visión. Similarmente, la posición base asociada a la fase del protocolo ( $P_{ESTADO}$ ) y por tanto base del comportamiento proactivo, se obtiene de manera equivalente, a través de marcadores en el escenario quirúrgico.

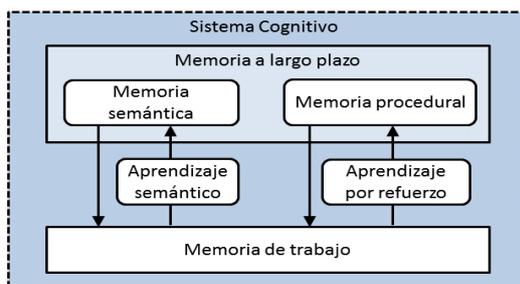


Figura 6. Sistema cognitivo.

### 3.2 APRENDIZAJE

El comportamiento del robot depende altamente de los valores de  $K_r$  y  $K_p$ . Valores elevados de  $K_r$  hacen que la cámara siga a las herramientas independientemente de la fase del protocolo, un comportamiento normalmente más cómodo para principiantes. Sin embargo, valores bajos de  $K_r$  hacen que la estrategia de navegación dependa del estado actual, comportamiento más apropiado para cirujanos expertos. Por lo tanto, para cada usuario, el sistema debe aprender los valores de  $K_r$  y  $K_p$  que proporcionan un mejor comportamiento del robot, es decir, que maximicen la satisfacción y rendimiento del usuario. El proceso de aprendizaje de estos valores se hace a través de un algoritmo de aprendizaje por refuerzo. Este método se basa en una serie de reglas ponderadas dependiendo del valor de refuerzo proporcionado al sistema. Este refuerzo depende de la adecuación de la regla elegida en cada momento, pudiendo ser un refuerzo o una penalización de la misma, dependiendo de lo acertada o no que fuese la acción para el estado actual del sistema [20].

Las reglas se codifican con una precondición ( SI ) y una acción ( ENTONCES ). La precondición depende de la fase actual del protocolo y la acción incluye todos los posibles valores de  $K_r = \{K_{r1}, K_{r2}, \dots, K_{rm}\}$  y  $K_p = \{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pm}\}$  tal que  $K_{pi} = 1 - K_{ri}$ . Por tanto, cada regla se codifica como:

$$SI \text{ fase} = i \text{ ENTONCES } K_r = K_{ri} \text{ y } K_p = K_{pi} \quad (6)$$

Donde  $1 \leq i \leq n$ , siendo  $n$  el número de fases del protocolo. Para cada fase se generan  $m$  reglas posibles, las  $m$  posibles combinaciones de las constantes  $K_r, K_p$ . Además, todas las reglas llevan asociada una ponderación dependiente del refuerzo siguiendo la técnica de *Q-learning* [21]:

$$Q_i = (1 - \tau) \cdot Q_{i-1} + \tau \cdot (\text{refuerzo} + \mu \cdot EFR) \quad (7)$$

Donde  $0 < \tau < 1$  es la tasa de aprendizaje;  $0 < \mu < 1$ , es el factor de descuento y EFR es el refuerzo futuro

esperado. La tasa de aprendizaje determina la importancia del nuevo conocimiento frente al antiguo; mientras que el factor de descuento determina la importancia de los refuerzos futuros. Finalmente, la manera de elegir una regla u otra en función del estado se realiza utilizando la política  $\epsilon$ -greedy [22]. Según ésta, las reglas cuya precondición se cumpla, son seleccionadas aleatoriamente con una probabilidad  $\epsilon$  y la acción con mayor ponderación es seleccionada con una probabilidad  $1 - \epsilon$ .

En cuanto al cálculo del refuerzo se hace a través de un modelo de lógica difusa que evalúa el comportamiento del robot durante cada fase. Este modelo depende de tres parámetros:

$$\text{refuerzo} = \text{difuso} (n\text{Correcciones}, \text{tiempo}, \text{satisfacción}) \quad (8)$$

Donde  $n\text{Correcciones}$  es el número total de correcciones que el usuario hace de la cámara utilizando el interfaz hombre-máquina de la arquitectura. *Tiempo*, es el tiempo total que tarda el usuario en completar una fase. Por último, *satisfacción*, es una variable cualitativa que mide cómo de satisfecho está el usuario tras haber completado la fase. El modelo de lógica difusa ha sido diseñado de manera que la satisfacción del usuario predomine sobre las otras dos variables. El tiempo y el número de correcciones informan si el comportamiento de la cámara ha ayudado al cirujano durante la tarea. Sin embargo, estas dos variables dependen de la destreza del cirujano y de las condiciones particulares de cada tarea.

En la Figura 7 se puede ver gráficamente todo el proceso de aprendizaje que se acaba de explicar.

## 4 RESULTADOS

El robot cámara y la arquitectura cognitiva presentados en este artículo han sido testeados y evaluados haciendo uso de la plataforma robótica quirúrgica CISOBOT, desarrollada por la Universidad de Málaga [23]. Esta plataforma está formada por dos brazos robóticos de 6 DoFs. A los efectores finales de los mismos se han conectado dos

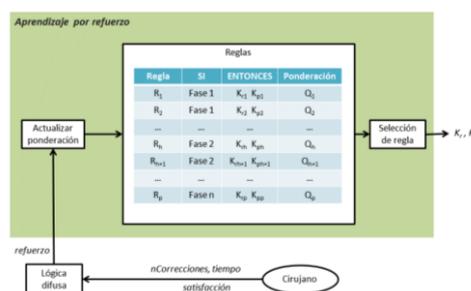


Figura 7. Algoritmo de aprendizaje por refuerzo.

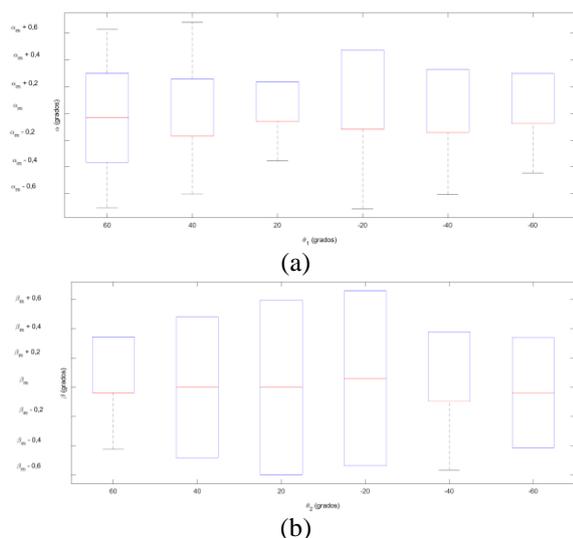


Figura 8. Distribuciones para los datos experimentales del análisis de repetitividad: (a) rotación; (b) inclinación.

herramientas quirúrgicas de agarre comerciales, previamente motorizadas para automatizar la apertura y cierre. Para teleoperar estas dos herramientas se han utilizado dos dispositivos hápticos. Por otro lado, el robot que controla los movimientos del robot cámara es una Barret WAM (Barrett Technology, Inc.), un brazo de 7 DoFs con baja fricción y baja inercia. Toda la arquitectura ha sido montada en ROS (Robotic Operating System) y utilizando como base cognitiva SOAR [24], una arquitectura cognitiva de propósito general.

Se han realizado dos tipos de experimentos, uno encaminado al análisis del robot cámara y otro para testear y comprobar la estrategia de navegación de la cámara dentro la arquitectura cognitiva. A continuación, se detalla los experimentos realizados y los resultados de los mismos.

#### 4.1 ANÁLISIS DEL ROBOT CÁMARA

Este experimento va encaminado al estudio del comportamiento de los grados de libertad internos del robot cámara. El control interno de la rotación ( $\alpha$ ) y la inclinación ( $\beta$ ) se realiza a través de un bucle abierto lo que impide medir la orientación de la cámara en un escenario real. Debido a esto, el comportamiento de estos movimientos ha sido estudiado a través de un análisis de repetitividad. En concreto, se han seleccionado 6 posiciones de los motores 1 y 2:  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Cada una de estas posiciones se ha repetido 10 veces y se ha medido el valor de  $\alpha$  y  $\beta$  para cada una de ellas. Las posiciones elegidas fueron:  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$ , y  $\pm 20^\circ$ . En la Figura 8 se ve la distribución de los datos obtenidos, donde  $\alpha_m$  y  $\beta_m$  representan el valor medio de  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente. Como se puede observar los valores medidos están

dentro del rango  $[\alpha_m - 0.7, \alpha_m + 0.7]$  y  $[\beta_m - 0.6, \beta_m + 0.65]$ . Teniendo en cuenta que el valor máximo para estos parámetros es de  $\pm 30$  grados, el máximo error es de 2.3% para  $\alpha$  y 2% para  $\beta$ . Estos errores son aceptables para mover la cámara dentro del ámbito quirúrgico, ya que este tipo de tareas no necesitan una precisión demasiado elevada. De hecho, posicionando la cámara a 10cm de altura, un error de  $0.7^\circ$  en la orientación se traduce en un error de 1.22mm en el área mostrada por la cámara, lo que se puede considerar despreciable.

#### 4.2 ESTRATEGIA DE NAVEGACIÓN

El objetivo de este experimento es probar la estrategia de navegación del robot cámara propuesto en este artículo. El experimento se basa en la primera tarea del manual SAGES para cirugía laparoscópica [25]. El principal objetivo de esta tarea es ejercitar la percepción en un escenario 2D, por lo que es adecuada para validar si la estrategia de navegación propuesta ayuda a los cirujanos o no. El escenario del experimento se puede ver en la Figura 9, éste es un tablero de clavijas comercial con dos anillos de goma (Anillo 1 y 2) y marcas de colores para identificar las distintas áreas de interés dentro del tablero. El experimento consiste en coger y ubicar en clavijas determinadas cada uno de los anillos. Siendo la secuencia de acciones la siguiente:

- *Estado 1.* Coger el anillo 1 de la clavija 1 con la herramienta izquierda.
- *Estado 2.* Transferir el anillo 1 de la herramienta izquierda a la derecha.
- *Estado 3.* Colocar el anillo 1 en la clavija 4.
- *Estado 4.* Coger el anillo 2 de la clavija 3 con la herramienta derecha.
- *Estado 5.* Transferir el anillo 2 de la herramienta derecha a la izquierda.
- *Estado 6.* Colocar el anillo 2 en la clavija 2.

Durante la realización de esta tarea el robot cámara se mueve de manera autónoma según la estrategia descrita en este artículo. Si el usuario no se encuentra cómodo con la vista presentada, puede modificarla a través del interfaz hombre-máquina también incluido en la arquitectura.

El experimento ha sido realizado por usuarios inexpertos y con el algoritmo de aprendizaje por refuerzo habilitado, de manera que la aportación de la estrategia reactiva y proactiva se adapte a cada uno de los usuarios. El objetivo de este experimento es analizar si la navegación aprende los parámetros  $K_r$  y  $K_p$  que maximizan el refuerzo obtenido en cada acción decidida por la arquitectura. Cada usuario ha realizado 15 repeticiones de la tarea anteriormente descrita. Los valores asociados al algoritmo de  $Q$ -



Figura 9. Vista inicial del experimento de navegación.

learning (ecuación (7)) elegidos son:  $\tau = 0.3$  y  $\mu = 0.9$ . Estos valores han sido elegidos para que la información ya obtenida prevalezca sobre la nueva. En cuanto al parámetro asociado a la política  $\epsilon$ -greedy, se ha elegido  $\epsilon = 0.4$ , para las 10 primeras repeticiones y  $\epsilon = 0.2$ , para las restantes. De esta manera, inicialmente se favorece la exploración de nuevos valores y para finalizar se explotan los datos ya conocidos.

La Figura 10 muestra los valores de  $K_r$  ( $K_p = 1 - K_r$ ) para cada usuario, definidos como la moda estadística de los resultados obtenidos en las 15 repeticiones. Se puede observar como los estados 1, 3, 4 y 6 tienen valores de  $K_r$  por debajo de 0.5. En estos casos los usuarios prefieren un control proactivo al reactivo. Sin embargo, en los estados 2 y 5 los valores  $K_r$  de están cercanos a la unidad, lo que implica que los cirujanos prefieren en estos casos un seguimiento del instrumental. También se puede observar como el valor  $K_r$  de es ligeramente distinto para cada usuario, debido a las preferencias particulares de cada uno.

Por otro lado, la Figura 11 muestra la frecuencia de aparición a lo largo de todo el experimento del valor de  $K_r$  que el sistema finalmente aprende para cada usuario. La barra roja representa la frecuencia global a lo largo de los 15 experimentos. Las otras tres barras representan la evolución de este porcentaje a lo largo del experimento. Como se puede observar, durante las cinco primeras repeticiones, la frecuencia de aparición del valor final de  $K_r$  elegido por el sistema es baja. Conforme el sistema va aprendiendo, en sucesivas repeticiones, se puede observar como dicha frecuencia aumenta, siendo máxima en las últimas 5 repeticiones, donde el sistema ha aprendido por completo el comportamiento con el que el usuario se siente más cómodo.

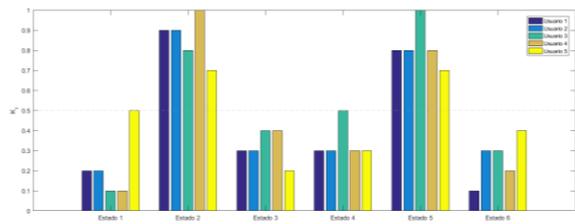


Figura 10. Valores de  $K_r$  aprendidos.

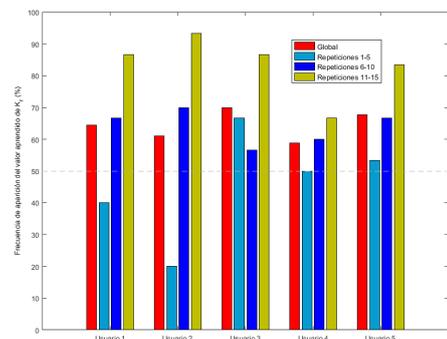


Figura 11. Frecuencia de aparición del valor aprendido de  $K_r$ .

## 5 CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el diseño mecánico y la arquitectura cognitiva de un novedoso concepto de asistente robótico camarógrafo. Éste está compuesto por un dispositivo intra-abdominal que contiene una cámara de alta resolución con un acople magnético que se conecta a un robot externo para su movimiento. Un novedoso mecanismo de cableado permite mover en rotación e inclinación la cámara.

La arquitectura cognitiva que controla el movimiento autónomo del robot cámara proporciona una estrategia de navegación con flexibilidad suficiente como para adaptarse a distintos usuarios y reaccionar ante situaciones imprevistas. Los resultados experimentales muestran como el punto de vista proporcionado por el robot cámara ayuda a los usuarios a realizar las tareas quirúrgicas.

## Referencias

- [1] V. Karimyan, M. Sodergren, J. Clark, G.Z. Yang, and A. Darzi, Navigation systems and platforms in natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES), *Int. Journal of Surgery*, vol. 7, no. 4, pp.297-304, 2009.
- [2] T. Hu, P.K. Allen, N.J. Hogle, D.L. Fowler, Insertable surgical imaging device with pan, tilt, zoom and lighting, *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 10, pp. 1373-1389, Oct. 2009.

- [3] C.A. Castro, S. Smith, A. Alqassis, T. Ketterl, Y. Sun, S. Ross, A. Rosemurgy, P.P. Savage, R.D. Gitlin, MARVEL: a wireless miniature anchored robotic videoscope for expedited laparoscopy, *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2012, pp. 2926-2931.
- [4] Valdastrì P, Quaglia C, Buselli E, Arezzo A, Di Lorenzo N, Morino M, Menciassi, P. Dario, A magnetic internal mechanism for precise orientation of the camera in wireless endoluminal applications, *Endoscopy*, vol. 42, no. 6, pp. 481-486, 2010.
- [5] A.C. Lehman, J. Dumpert, N.A. Wood, L. Redden, A.Q. Visty, S. Farritor S, B. Varnell, D. Oleynikov, Natural Orifice Cholecystectomy Using a Miniature Robot, *Surg Endosc*, vol. 23, pp.260-266, 2009.
- [6] J. Cadeddu, R. Fernandez, M. Desai, R. Bergs, C. Tracy, S.J. Tang, P. Rao, M. Desai, D. Scott, Novel Magnetically Guided Intra-abdominal Camera to Facilitate Laparoendoscopic Single-Site Surgery: initial human experience, *Surg Endosc*, vol. 23, no. 8, pp.1894-1899, 2009.
- [7] M. Fakhry, B. Gallagher, F. Bello, G.B. Hanna, Visual Exposure Using Single-Hand Magnet-Driven Intra-abdominal Wireless Camera in Minimally Access Surgery, *Surg Endosc*, vol. 23, pp. 539-543, 2009.
- [8] M. Simi, M. Silvestri, C. Cavallotti, M. Vatteroni, P. Valdastrì, A. Menciassi, P. Dario, Magnetically Activated Stereoscopic Vision System for Laparoscopic Single-Site Surgery, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 18, no. 3, pp. 1140-1151, 2013.
- [9] R.H. Taylor, P. Kazanzides, Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine, *Adv. in Computers*, vol. 73, pp. 219-260, 2008.
- [10] M. Azizian, M. Khoshnam, N. Najmaei, R.V. Patel, Visual servoing in medical robotics: A survey. Part I: Endoscopic and direct vision imaging Techniques and applications, *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg*, vol. 11, no. 1, pp. 67-79, 2013.
- [11] A. Casals, J. Amat, and E. Laporte, Guidance of an assistant robot in laparoscopic surgery, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, Apr 1996, pp. 895–900.
- [12] O. Weede, A. Bihlmaier, J. Hutzl, B.P. Müller-Stich, H. W rn, Towards Cognitive Medical Robotics in Minimal Invasive Surgery *Proc. of the Conf. on Adv. in Robotics*, 2013, pp. 1–8.
- [13] B.W. King, L.A. Reisner, A.K. Pandya, A.M. Composto, R.D. Ellis, M.D. Klein, Towards an autonomous robot for camera control during laparoscopic surgery, *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.*, vol. 23, pp. 1027–1030, 2013.
- [14] J. Rosen, J.D. Brown, L. Chang, M.N. Sinanan, B. Hannaford, Generalized approach for modeling minimally invasive surgery as a stochastic process using a discrete Markov model, *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 53, no. 3, pp. 399–413, 2006.
- [15] S.Y. Ko, J. Kim, D.S. Kwon, and W.J. Lee, Intelligent interaction between surgeon and laparoscopic assistant robot system, *IEEE Int. Workshop on Robots and Human Interactive Communication*, pp. 60- 65, Oct. 2005.
- [16] I. Rivas-Blanco, B. Estebanez, M. Cuevas-Rodríguez, E. Bauzano, V.F. Muñoz, Towards a cognitive camera robotic assistant, *IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2014, pp. 739-744.
- [17] A. Pandya, L. A. Reisner, B. King, N. Lucas, A. Composto, M. Klein, R.D. Ellis, Review A Review of Camera Viewpoint Automation in Robotic and Laparoscopic Surgery, *Robotics*, vol. 3, pp. 310-329, 2014.
- [18] E. Bauzano, B. Estebanez, I. Garcia-Morales, and V.F. Muñoz- Martínez, Collaborative Human-Robot System for HALS suture procedures *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 957-966, 2014.
- [19] B. Estebanez, P. del Saz-Orozco, I. Rivas-Blanco, E. Bauzano, V.F. Muñoz, I. García-Morales, Maneuvers recognition in laparoscopic surgery: artificial neural network and hidden Markov model approaches, *IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2012, pp. 1164-1169.
- [20] Y. Song, Y-B. Li, C-H. Li, G-F. Zhang, An efficient initialization approach of Q-learning for mobile robots, *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 166-172, 2012.
- [21] M.L. Littman, Value-function reinforcement learning in Markov games, *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 2, pp. 55-66, 2001.
- [22] M. Tokic, G. Palm, Value-Difference Based Exploration: Adaptive Control between Epsilon-Greedy and Softmax, *Proc. of the 34th Annual German Conf. on Adv. in artificial intelligence*, Berlin, Germany, 2011, pp. 335-346.
- [23] C.J. Pérez-del-Pulgar, I. García-Morales, I. Rivas-Blanco, V.F. Muñoz, Navigation method for teleoperated single-port access surgery with soft tissue interaction detection, *IEEE Systems Journal*, in press, 2016.
- [24] J. Laird, Extending the Soar Cognitive Architecture, *Proc. of the first AGI conference*, 2008, pp. 224-235.
- [25] I. Choy, A. Okraíneć, Fundamentals of laparoscopic surgery-FLS, *The SAGES manual of Quality, Outcomes and Patient Safety*, vol. 46, pp. 461-471, 2012.