

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

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 Politécnica 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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN 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/> Automar <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/> Bioingeniería <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/> Control Inteligente <hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote.	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluze, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO.....	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.....	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.....	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> Educación en Automática <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>	

ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES

Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis M. Jiménez, Sergio Cebollada y Oscar Reinoso
 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Miguel Hernández University, Spain
 {yberenguer, lpaya, m.ballesta, luis.jimenez, sergio.cebollada, o.reinoso}@umh.es

Resumen

Este trabajo presenta un algoritmo SLAM para estimar la posición y orientación de un robot móvil al mismo tiempo que crea un mapa del entorno. Utiliza solo la información visual proporcionada por un sistema catadióptrico montado en el robot, formado por una cámara que apunta hacia un espejo convexo, que proporciona al robot imágenes omnidireccionales que contienen información con un campo de visión de 360 grados alrededor del eje central del espejo. Cada imagen omnidireccional adquirida por el robot se describe utilizando descriptores de apariencia global, que permiten ejecutar nuestro algoritmo en tiempo real gracias a su compacidad. El método consta de tres pasos diferentes. En primer lugar, el robot calcula su posición y orientación, y crea un nuevo nodo en el mapa, el cual está formado por nodos conectados entre ellos. En segundo lugar, detecta cierres de bucle entre el nuevo nodo y los nodos del mapa. Finalmente, el mapa se optimiza utilizando un algoritmo de optimización y los cierres de bucle detectados. Se han utilizado dos conjuntos diferentes de imágenes para probar la eficacia del método, los cuales fueron capturados en dos entornos reales. Los resultados de los experimentos muestran la eficacia de nuestro método.

Palabras clave: SLAM, Apariencia Global, Imágenes Omnidireccionales

1. INTRODUCCIÓN

El SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) se ha considerado como una de las tecnologías más importantes en la investigación de la robótica móvil durante los últimos años [1, 2]. Muchos de estos trabajos se centran en el uso de información visual para desarrollar algoritmos de SLAM, debido a la rica información proporcionada por los sensores visuales.

Además de esto, los sensores visuales se pueden configurar de diferentes maneras como cámaras convencionales, sistemas estéreo, matrices de cámaras o sistemas catadióptricos. Esta última configuración está formada por una cámara apuntando hacia un espejo convexo [3]. La imagen resultante capturada por este último tipo de cámara contiene información sobre un campo de

visión de 360 grados alrededor del eje del espejo de la cámara. Esto proporciona imágenes omnidireccionales.

En el campo del SLAM, las imágenes omnidireccionales tienen multitud de ventajas gracias a su campo de visión, ya que una sola imagen contiene información de todos los alrededores del robot. Podemos encontrar muchos trabajos previos que usan imágenes omnidireccionales en tareas de creación de mapas y localización. Por ejemplo, Valiente et al. [4] presenta una comparación entre dos métodos visuales SLAM diferentes usando imágenes omnidireccionales y Garcia et al. [5] muestra una recopilación de métodos de creación de mapas y localización basados en visión por computador.

Tradicionalmente, las investigaciones sobre robots móviles que utilizan sensores visuales se basan en la extracción y descripción de algunos puntos característicos de las escenas, como descriptores SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [6] y SURF (Speeded-Up Robust Features) [7]. Este enfoque presenta algunas desventajas: el tiempo computacional para calcular y comparar los descriptores suele ser alto, y conduce a algoritmos de localización y creación de mapas relativamente complejos. Como ventaja, sólo se necesitan algunas posiciones almacenadas en el mapa para hacer posible el proceso de localización.

Más recientemente, algunos autores proponen utilizar la información global para describir las escenas, creando un descriptor único por imagen. Estas técnicas han demostrado ser una buena opción para resolver los problemas de localización y navegación cuando el movimiento del robot está contenido en el plano del suelo. Por ejemplo, Chang et al. [8] presenta un sistema de navegación y localización basado en la visión que utiliza el descriptor *gist*. Payá et al. [9] utilizan un descriptor basado en la firma de Fourier para realizar tareas de localización usando un algoritmo Monte Carlo, y Wu et al. [10] proponen un método de detección de cierre de bucle visual de manera eficiente. En [11], se analizan y comparan varios métodos para obtener descriptores globales de escenas panorámicas y se demuestra su validez en la construcción de mapas y la localización. La mayoría de estos descriptores de apariencia global se pueden usar en tiempo real porque el

tiempo computacional para calcularlos y manejarlos es bajo, y generalmente llevan a algoritmos de creación de mapas y localización más directos.

Habitualmente, el proceso de creación de mapas produce un error en cada posición del mapa debido al cálculo iterativo de nuevas poses (posición y orientación) del robot. Esto puede ser un gran problema en entornos extensos cuando el robot tiene que calcular muchas poses nuevas, ya que el error está aumentando en cada iteración. Esta incertidumbre puede reducirse mediante la detección de cierres de bucle y el uso de algoritmos de optimización para reubicar las poses. Este problema se estudia a fondo en este trabajo.

La contribución de este trabajo es la creación de un método para llevar a cabo las tareas de SLAM utilizando sólo la información visual del entorno y los descriptores de apariencia global. Cada escena omnidireccional adquirida por el robot se describe utilizando estos descriptores. El método consta de tres pasos diferentes: calcular la pose del robot (posición y orientación), detectar cierres de bucle (comparando descriptores de apariencia global) y optimizar el mapa (utilizando el algoritmo de optimización G2O). El algoritmo de optimización utilizado se denomina G2O y fue presentado por Kümmerle et al. [12].

Los experimentos se han llevado a cabo con dos conjuntos diferentes de imágenes capturadas en dos entornos reales de trabajo. El primero se ha tomado siguiendo un camino rectangular en un entorno interior y el segundo ha sido capturado siguiendo un camino real incluyendo varias habitaciones en un edificio.

El resto de este trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 introduce algunos conceptos preliminares sobre la descripción de la imagen y la optimización de grafos. La sección 3 presenta el algoritmo de SLAM que hemos implementado para resolver el problema de localización y creación de mapas de manera simultánea. La sección 4 describe las bases de datos utilizadas para llevar a cabo los experimentos y presenta los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 5 esboza las conclusiones.

2. PRELIMINARES

A lo largo de este artículo, se utilizan dos métodos para describir la apariencia global de las escenas: la transformada de Radon y HOG (Histogram of Oriented Gradients), los cuales son descritos en esta sección. Además, se presentan los fundamentos de los métodos utilizados para calcular la diferencia entre dos imágenes capturadas en diferentes posiciones. Por último, describimos el algoritmo de optimización utilizado para recalcular las posiciones de mapa después de detectar cierres de bucle.

2.1. Descriptores de Apariencia Global

Los métodos basados en la apariencia global de las escenas constituyen una alternativa robusta a los métodos basados en la extracción de características. Esto se debe a que los descriptores basados en apariencia global representan el entorno a través de características de alto nivel que se pueden interpretar y manejar fácilmente.

Esta subsección presenta los descriptores que hemos utilizado para describir las imágenes omnidireccionales. Ambos se basan en la apariencia global, sin ninguna segmentación o extracción local de características.

2.1.1. Transformada de Radon

La transformada de Radon se describió inicialmente en [13]. Existen trabajos que demuestran la eficacia de este descriptor en la descripción de formas y en la segmentación, tales como [14] y [15]. Hoang et al. [14] presentan un descriptor de forma, invariante a transformaciones geométricas, basado en las transformadas de Radon, Fourier y Mellin, y Hasegawa et al. [15] presentan un descriptor de formas que combina el histograma de la transformada de Radon y la correlación de fase. Berenguer et al. [16] presentan un método de localización 2D usando un descriptor de apariencia global basado en la transformada Radon y demuestran la eficacia y robustez de este descriptor.

Matemáticamente, la transformada de Radón de una imagen $im(i, j) \in \mathbb{R}^{K \times L}$ a lo largo de la línea $c_1(\phi, d)$ (Figura 1) puede obtenerse como:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}\{im(i, j)\} &= \lambda_f(\phi, d) = \\ &= \int_{\mathbb{R}} im(d \cos \phi - j' \sin \phi, d \sin \phi + j' \cos \phi) dj' \quad (1) \end{aligned}$$

donde \mathcal{R} es el operador de la transformada de Radon. $im(i, j)$ es la imagen a transformar. λ_f es la imagen transformada, la cual depende de dos variables diferentes: la distancia desde la línea c_1 hasta el origen d y del ángulo entre los ejes x e i' , ϕ (Figura 1). El eje j' es paralelo a la línea c_1 .

Si consideramos diferentes valores para d y ϕ en la Ecuación (1), la función transformada $\lambda_f(\phi, d)$ se convertirá en una matriz con M filas y N columnas. M es el número de orientaciones consideradas (normalmente elegidas para cubrir toda la circunferencia), y N es el número de líneas paralelas consideradas en cada orientación (para cubrir toda la imagen). La distancia entre cada par de líneas consecutivas se considera constante.

Cuando la transformada de Radon se aplica a una imagen, se calculan las proyecciones de la imagen a lo largo de las direcciones especificadas a través de un grupo de integrales de línea a lo largo de un haz de

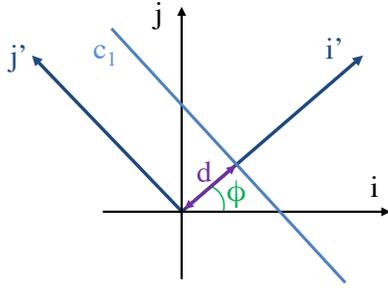


Figura 1: Parametrización de línea mediante la distancia origen d y el ángulo entre la línea normal y el eje i , ϕ .

líneas paralelas a dichas direcciones. La distancia entre cada par de líneas paralelas suele ser un píxel.

2.1.2. Histogram of Oriented Gradients (HOG)

HOG se ha utilizado tradicionalmente como un método de descripción en el campo de la detección de objetos. Fue descrito inicialmente por [17] y lo usaron en tareas de detección de personas. Sin embargo, hay varias investigaciones en las que se ha mejorado este método de descripción, como [18], donde mejoran la precisión y el coste computacional.

La implementación básica consiste en dividir la imagen en pequeñas celdas conectadas y calcular el histograma de las orientaciones del gradiente en cada celda. Entonces, el descriptor se compone de estos histogramas dispuestos en un solo vector.

Fernández et al. [19] analizan este tipo de descriptor en tareas de localización al aire libre. Además, hacen un análisis comparativo entre varios métodos para describir imágenes panorámicas.

2.2. Phase Only Correlation (POC)

En esta subsección se presenta el método utilizado para comparar la transformada de Radon de dos imágenes, el cual proporciona una medida de la diferencia entre la apariencia visual de dos ubicaciones y la estimación del cambio de orientación del robot entre estas ubicaciones.

POC (Phase Only Correlation), propuesto en [20], es una operación realizada en el dominio de la frecuencia que proporciona un coeficiente de correlación entre dos imágenes [21]. En nuestro caso, comparamos dos transformadas de Radon, pero esto no afecta al funcionamiento de POC porque la transformada de Radon se puede interpretar como una imagen. En general, permite obtener tanto la orientación relativa entre dos diferentes transformadas de Radon como un coeficiente de similitud entre ellas, como se muestra en [16].

La correspondencia entre dos imágenes $im_1(i, j)$ e $im_2(i, j)$ calculadas por POC viene dada por la siguiente ecuación:

$$C(i, j) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{IM}_1(u, v) \cdot \mathbf{IM}_2^*(u, v)}{|\mathbf{IM}_1(u, v) \cdot \mathbf{IM}_2^*(u, v)|} \right\} \quad (2)$$

Donde \mathbf{IM}_1 es la transformada de Fourier de la imagen 1 y \mathbf{IM}_2^* es el conjugado de la transformada de Fourier de la imagen 2. \mathcal{F}^{-1} es el operador inverso de la transformada de Fourier.

Para estimar la distancia entre las dos imágenes (im_1 e im_2) hemos utilizado la siguiente expresión:

$$dist(im_1, im_2) = 1 - \max\{C(i, j)\} \quad (3)$$

$\max\{C(i, j)\}$ es un coeficiente que toma valores en el intervalo $[0, 1]$ y mide la similitud entre las dos imágenes im_1 e im_2 .

Esta operación es invariante frente a desplazamientos de las imágenes a lo largo de los ejes i y j . Además, es posible estimar estos desplazamientos Δ_x y Δ_y a lo largo de ambos ejes mediante:

$$(\Delta_x, \Delta_y) = \operatorname{argmax}_{(i, j)} \{C(i, j)\} \quad (4)$$

Si comparamos las transformadas de Radon de dos imágenes omnidireccionales usando POC, el valor Δ_x es proporcional a la orientación relativa α del robot al capturar las imágenes, de acuerdo con la Ecuación (5). La Figura 2 muestra las transformaciones de Radon de dos imágenes omnidireccionales diferentes capturadas desde el mismo punto (x_w, y_w, z_w) pero con orientaciones del robot diferentes con respecto al eje z_w , θ (Figura 2).

$$\alpha = \frac{\Delta_x \cdot 2\pi}{N} \quad (5)$$

De esta manera, POC es capaz de comparar dos imágenes independientemente en la orientación y también es capaz de estimar este cambio de orientación.

2.3. Algoritmo de optimización: G2O

G2O es un algoritmo de optimización descrito en [12]. Este método fue creado para optimizar funciones de errores no lineales basadas en grafos.

En el campo del SLAM, el robot tiene que calcular su pose cuando toma cada nueva imagen con respecto a las poses anteriores almacenadas en el mapa. Esta operación tiene un error asociado que va incrementando con cada nuevo cálculo de pose, por lo que necesitamos corregir las poses almacenadas en el mapa para disminuir esta desviación. G2O puede volver a calcular cada pose del mapa usando nuevas restricciones.

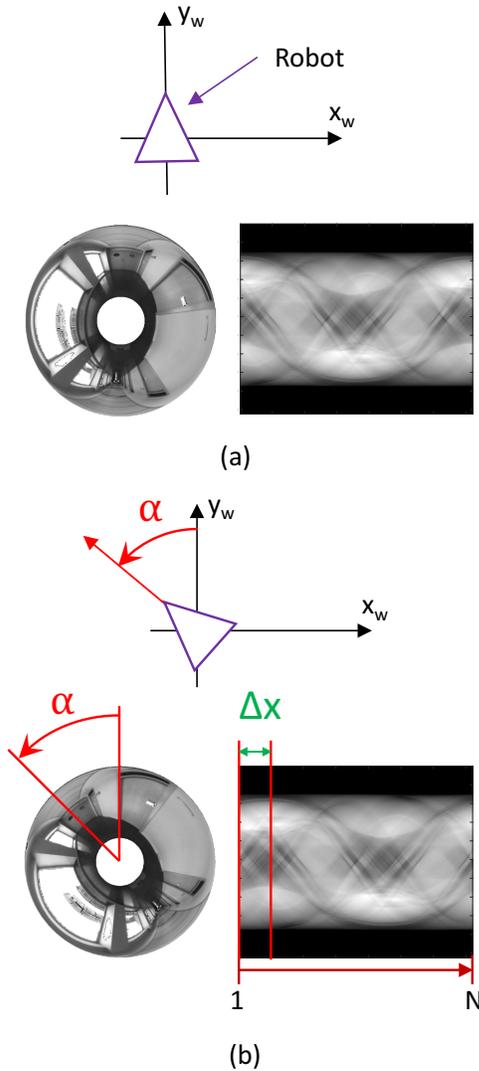


Figura 2: (a) Imagen omnidireccional capturada desde una posición específica de un entorno virtual y su transformada Radon. (b) Imagen omnidireccional tomada desde el mismo lugar cambiando solamente la orientación del robot alrededor del eje z_w , y su transformada Radon. Un cambio en la orientación del robot alrededor del eje z_w produce un desplazamiento en las columnas de la transformada Radon, Δx .

Una de estas restricciones se puede obtener cuando se producen cierres de bucle entre una pose del mapa existente y la nueva pose del robot. Entonces, G2O reubica cada nodo del mapa modificándolos gradualmente para cumplir con la restricción de cierre de bucle. Entonces, el nuevo nodo se ubica en la misma posición que la pose equivalente almacenada en el mapa.

3. ALGORITMO DE SLAM

En esta sección, presentamos nuestro algoritmo de SLAM visual. El robot pasa por el entorno y captu-

ra imágenes de algunas posiciones. Cada vez que llega una nueva imagen, el robot incluye un nuevo nodo dentro del mapa, el cual está formado por nodos. A continuación, se resuelve el problema SLAM siguiendo estos tres pasos:

Primero, el robot calcula dos descriptores de la imagen: la transformada de Radon y el descriptor HOG y los almacena en el nodo. Entonces, el robot crea un nuevo nodo y lo ubica dentro del mapa calculando la posición y orientación del nuevo nodo con respecto al nodo previamente agregado y se crea un enlace entre ambos nodos. Este proceso de localización se realiza utilizando sólo información visual.

En segundo lugar, el robot comprueba la existencia de posibles cierres de bucle comparando la nueva escena con las escenas anteriores almacenadas en el mapa.

Finalmente, el mapa se optimiza utilizando el algoritmo G2O con los cierres de bucle detectados. Este proceso se repite en cada nueva ubicación.

3.1. Creación del mapa

Esta subsección presenta el método propuesto para calcular las coordenadas de las poses de los nuevos nodos. Estas poses se calculan obteniendo la distancia y el ángulo entre las escenas. Para cada nuevo nodo, el robot almacena el descriptor de Radon y el descriptor HOG de la nueva imagen omnidireccional para hacer posible su localización.

La Figura 3 muestra un esquema del proceso de creación de mapas. Consiste en el cálculo de las coordenadas (x_k, y_k) de cada nuevo nodo. Estas coordenadas se calculan a partir de la distancia y el ángulo respecto a la posición anterior.

La distancia entre ubicaciones se calcula usando la Ecuación 3. Es una distancia imagen y no es una distancia métrica, es decir, esta distancia no es una unidad de medida real, sino que es proporcional a la distancia métrica.

β_k , es aproximadamente el ángulo de orientación, α_k , calculado usando la Ecuación 5:

$$\beta_k \approx \alpha_k \quad (6)$$

Cuanto más cerca están las poses, más exacta es la aproximación, ya que el cambio de orientación del robot es menor, y el error cometido en la aproximación se reduce. Sin embargo, cabe tener en cuenta que se trata de estimaciones cuyo error se reducirá durante el posterior proceso de optimización cuando se detecte un cierre de ciclo.

Finalmente, las coordenadas de cada nodo (x_k, y_k) se calculan mediante estas ecuaciones:

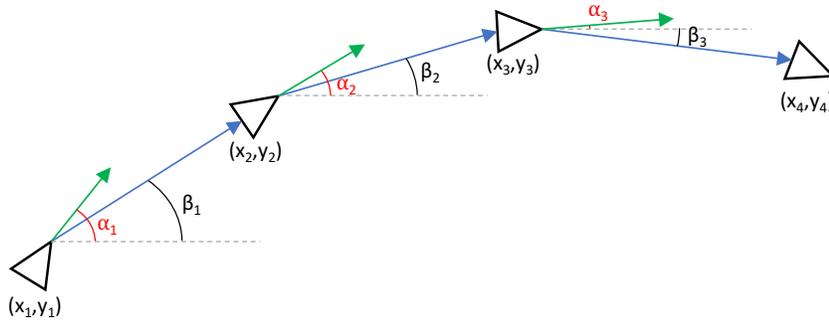


Figura 3: Esquema del proceso de creación de mapas.

$$x_k = \text{dist}(im_{k-1}, im_k) \cdot \cos(\alpha_k) \quad (7)$$

$$y_k = \text{dist}(im_{k-1}, im_k) \cdot \sin(\alpha_k) \quad (8)$$

donde $\text{dist}(im_{k-1}, im_k)$ es la distancia POC entre dos imágenes consecutivas calculadas usando la Ecuación 3, y α_k es el ángulo de orientación del nodo k , calculado usando la Ecuación 5.

3.2. Cierres de Bucle

El siguiente paso del algoritmo consiste en detectar cierres de bucle. Para ellos, se compara el descriptor HOG de la nueva imagen tomada por el robot con los descriptores HOG almacenados en el mapa. Para calcular la distancia entre los descriptores HOG se utiliza la similitud de coseno entre ellos para calcular la distancia:

$$\text{dist}(\vec{d}_1, \vec{d}_2) = 1 - \frac{\vec{d}_1 \cdot \vec{d}_2^T}{\sqrt{(\vec{d}_1 \cdot \vec{d}_1^T)(\vec{d}_2 \cdot \vec{d}_2^T)}} \quad (9)$$

donde \vec{d}_1 y \vec{d}_2 son los descriptores HOG de dos imágenes diferentes.

Los cierres de bucle deben determinarse definiendo un umbral máximo de distancia, W (Ecuación 10). Este umbral se define como una constante en el inicio del proceso de SLAM. Si la distancia es inferior a este umbral, las dos poses comparadas se considerarán como la misma posición (x, y) , pero la orientación del robot puede ser diferente.

$$\text{if}(\text{dist}(\vec{d}_1, \vec{d}_2) < W) \rightarrow \text{cierre de bucle} \quad (10)$$

3.3. Optimización del mapa

Teniendo en cuenta los cierres de bucle detectados, el robot utiliza esta información para optimizar el mapa almacenado. Esta optimización se realiza utilizando el algoritmo de optimización G2O.

Cuando el robot detecta un cierre de bucle, tiene que reubicar todos los nodos anteriores para reducir el error asociado en cada posición. Este proceso modifica todas las posiciones de los nodos en el mapa para tener en cuenta la nueva restricción calculada por la detección de cierre de bucle.

La modificación de la ubicación de los nodos se realiza mediante el algoritmo G2O. Dicho algoritmo recibe como entrada todas las posiciones de los nodos del mapa y la restricción de cierre de bucle. Entonces, G2O da como salida las nuevas posiciones de los nodos recalculadas.

Por lo tanto, los dos nodos del cierre del bucle se localizan en la misma posición y se modifican las coordenadas del resto de los nodos del mapa.

4. EXPERIMENTOS

Esta subsección presenta los diferentes conjuntos de imágenes omnidireccionales utilizados para probar nuestro método y los resultados obtenidos en estos experimentos.

4.1. Bases de datos

Para comprobar el funcionamiento de la técnica propuesta, se utilizan dos conjuntos de imágenes capturadas por nosotros mismos. Para capturar el primer conjunto, el robot fue teleoperado para seguir un camino rectangular. El segundo conjunto de imágenes fue capturado mientras el robot seguía un camino más complicado a través de varias habitaciones dentro de un edificio. Figura 4 muestra una imagen omnidireccional de muestra de cada entorno.

Estas dos bases de datos se han creado tomando una imagen omnidireccional cada 40 cm aproximadamente. La Figura 5 muestra el sistema catadióptrico utilizado para capturar las imágenes omnidireccionales, formado por la cámara (modelo: DFK-41BF02) y el espejo hiperbólico (modelo: Eizo Wide70).

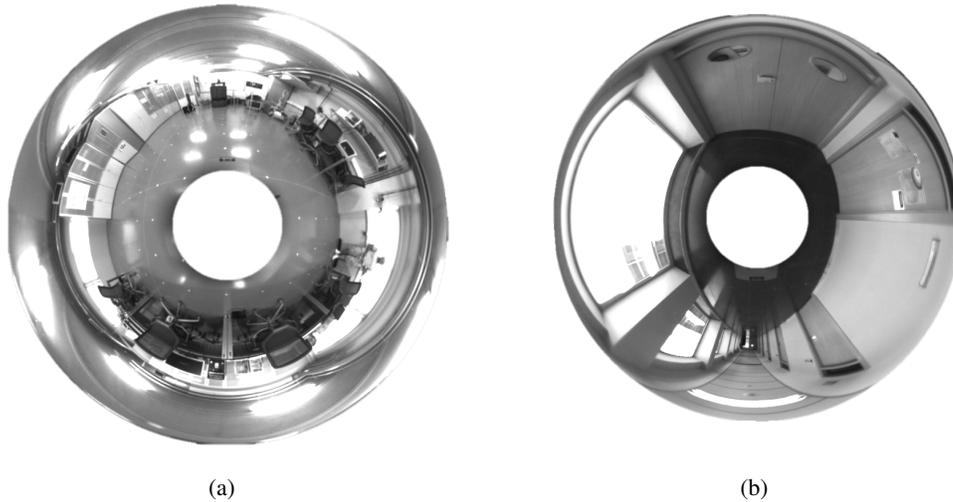


Figura 4: (a) Muestra de una imagen omnidireccional de la trayectoria rectangular.(b) Imagen de muestra del segundo recorrido.



Figura 5: Sistema de adquisición de imágenes omnidireccionales.

4.2. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de los experimentos realizados con nuestro algoritmo SLAM. Las dos bases de datos descritas en la sección 4.1 se han utilizado para llevar a cabo estos experimentos.

El umbral máximo de distancia entre descriptores HOG es un parámetro importante a sintonizar. Para ello, hemos hecho algunas pruebas y elegido el mejor valor para detectar cierres de bucles. Después de estas pruebas se considera un umbral igual a 0,006 como un buen valor de la distancia entre descriptores HOG.

La Figura 6 muestra los resultados del algoritmo SLAM después de incorporar la posición final de la

primera ruta. La línea azul es el mapa creado sin optimización y la línea verde es el mismo mapa optimizado. Esta optimización se realiza en cada iteración pero el mapa sin ninguna optimización se muestra a efectos comparativos. Como podemos ver, la línea verde es un camino cuadrado.

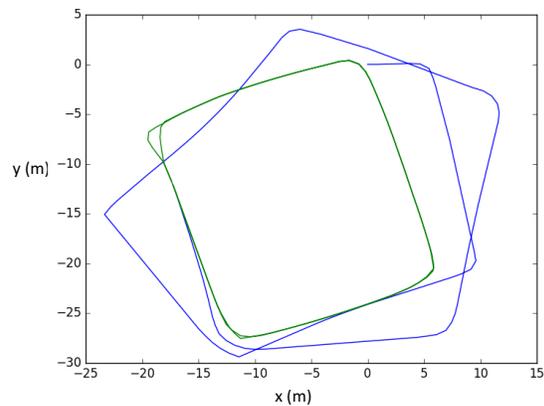


Figura 6: Mapa creado utilizando el primer recorrido. La línea azul es el mapa creado sin optimización y la línea verde es el mismo mapa optimizado.

La Figura 7 muestra los mismos resultados que en la Figura 6 pero utilizando la segunda ruta. La línea azul es el mapa creado sin optimización, la línea verde es el mismo mapa optimizado y la línea amarilla es la trayectoria real.

En cuanto al tiempo computacional, el robot pasa un promedio de 0,65 segundos en cada iteración del proceso SLAM. Este tiempo aumenta en cada iteración porque el mapa está formado por mayor cantidad de nodos y la detección de cierre de bucle necesita comparar un mayor número de descriptores HOG.

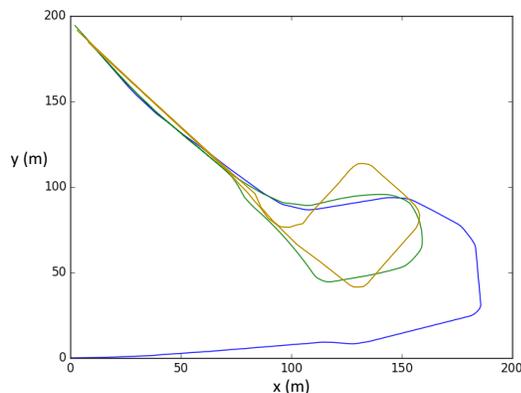


Figura 7: Mapa creado utilizando el segundo recorrido. La línea azul es el mapa creado sin optimización, la línea verde es el mismo mapa optimizado y la línea amarilla es la trayectoria real.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado un método SLAM para estimar la posición y la orientación de un robot móvil en un entorno a la vez que el robot crea el mapa. Utilizamos dos descriptores de apariencia global diferentes para llevar a cabo el proceso SLAM y el mapa está formado por estos dos descriptores de cada imagen. Por último, el algoritmo ha sido probado con dos conjuntos de imágenes capturadas en dos entornos interiores diferentes.

Los resultados han demostrado la exactitud del método. En cuanto a los valores de los parámetros, el umbral máximo de distancia entre descriptores HOG es el parámetro de ajuste principal en este método.

Los resultados presentados en este trabajo muestran la efectividad de los descriptores de apariencia global de imágenes omnidireccionales para llevar a cabo tareas de SLAM gracias a la riqueza de la información que contienen. Ahora estamos trabajando para mejorar este método y estamos tratando de estimar con mayor precisión la orientación relativa entre los nodos. Además, estamos implementando un método de agrupación para reducir el tiempo computacional para detectar cierres de bucle cuando se aumenta el número de nodos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno español a través del proyecto DPI2016-78361-R (AEI/FEDER, UE) “Creación de Mapas Mediante Métodos de Apariencia Visual para la Navegación de Robots”.

Referencias

- [1] R. Munguia, S. Urzua, and A. Grau, “Delayed monocular slam approach applied to unmanned aerial vehicles,” *PLOS ONE*, vol. 11, no. 12, pp. 1–24, 12 2016.
- [2] T. Whelan, R. F. Salas-Moreno, B. Glocker, A. J. Davison, and S. Leutenegger, “Elasticfusion: Real-time dense slam and light source estimation,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, no. 14, pp. 1697–1716, 2016.
- [3] H. Nagahara, K. Yoshida, and M. Yachida, “An omnidirectional vision sensor with single view and constant resolution,” in *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, Oct 2007, pp. 1–8.
- [4] D. Valiente, A. Gil, L. Fernández, and O. Reinoso, “A comparison of ekf and sgd applied to a view-based slam approach with omnidirectional images,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 2, pp. 108–119, 2014.
- [5] E. Garcia-Fidalgo and A. Ortiz, “Vision-based topological mapping and localization methods: A survey,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 64, pp. 1–20, 2015.
- [6] D. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” in *ICCV 1999, International Conference on Computer Vision*, vol. 2, 1999, pp. 1150–1157.
- [7] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Gool, “Surf: Speeded up robust features,” *Computer Vision at ECCV*, vol. 3951, pp. 404–417, 2006.
- [8] C. Chang, C. Siagian, and L. Itti, “Mobile robot vision navigation and localization using gist and saliency,” in *IROS 2010, International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 4147–4154.
- [9] L. Payá, L. Fernández, L. Gil, and O. Reinoso, “Map building and monte carlo localization using global appearance of omnidirectional images,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 11 468–11 497, 2010.
- [10] J. Wu, H. Zhang, and Y. Guan, “An efficient visual loop closure detection method in a map of 20 million key locations,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2014, pp. 861–866.
- [11] L. Payá, F. Amorós, L. Fernández, and O. Reinoso, “Performance of global-appearance descriptors in map building and localization using omnidirectional vision,” *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 3033–3064, 2014.
- [12] R. Kümmerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige, and W. Burgard, “G2o: A general framework for graph optimization,” in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2011, pp. 3607–3613.
- [13] J. Radon, “Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten,” *Berichte Sachsische Akademie der Wissenschaften*, vol. 69, no. 1, pp. 262–277, 1917.
- [14] T. Hoang and S. Tabbone, “A geometric invariant shape descriptor based on the radon, fourier, and mellin transforms,” in *20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Aug 2010, pp. 2085–2088.

- [15] M. Hasegawa and S. Tabbone, "A shape descriptor combining logarithmic-scale histogram of radon transform and phase-only correlation function," in *2011 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, Sept 2011, pp. 182–186.
- [16] Y. Berenguer, L. Payá, M. Ballesta, and O. Reinoso, "Position estimation and local mapping using omnidirectional images and global appearance descriptors," *Sensors*, vol. 15, no. 10, p. 26368, 2015.
- [17] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, vol. 1, June 2005, pp. 886–893 vol. 1.
- [18] Q. Zhu, M.-C. Yeh, K.-T. Cheng, and S. Avidan, "Fast human detection using a cascade of histograms of oriented gradients," in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, vol. 2, 2006, pp. 1491–1498.
- [19] L. Fernández, L. Payá, O. Reinoso, L. Jiménez, and M. Ballesta, "A study of visual descriptors for outdoor navigation using google street view images," *Journal of Sensors*, vol. 2016, 2016.
- [20] C. Kuglin and D. Hines, "The phase correlation image alignment method," in *In Proceedings of the IEEE, International Conference on Cybernetics and Society*, 1975, pp. 163–165.
- [21] K. Kobayashi, T. Aoki, K. Ito, H. Nakajima, and T. Higuchi, "A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, pp. 682–691, 2004.