



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



CEA

IFAG

comité
español de
automática

XXXV alencia

Jornadas de AUTOMATICA
3- 5 de Septiembre 2014

- Libro de Actas -

Actas de las XXXV Jornadas de Automática

3 – 5 de Septiembre de 2014, Valencia

ISBN-13: 978-84-697-0589-6

© Comité Español de Automática (CEA-IFAC)



Tabla de Contenidos

PhotoBioLib: una librería de Modelica para el modelado y simulación de fotobiorreactores	1
<i>Agustín Pérez-Castro, José Sánchez, Francisco Gabriel Acién, Ignacio Fernández, José Luis Guzmán</i>	
CONTROL DE UN ASCENSOR COMO CASO PRÁCTICO PARA LA DOCENCIA DE CONTROL AVANZADO	2
<i>Adrián Peidró, Arturo Gil, José María Marín, Luís Payá, Óscar Reinoso</i>	
Planificación de misiones de vehículos aéreos no tripulados con Fast Marching en un entorno 3D	3
<i>Verónica González Pérez, Concepción Alicia Monje Micharet, Carlos Balaguer</i>	
Estudio de la robustez de los metodos de control para exoesqueletos de miembros inferiores	4
<i>Ranko Zotovic Stanisic, Julio Hernando Vargas Riaño</i>	
Helicopter Main Rotor Vibration Analysis with Varying Rotating Speed	5
<i>Salvador Castillo-Rivera, Maria Tomas-Rodriguez, G. Nicolas Marichal Plasencia</i>	
CLASIFICACIÓN DE CAMBIOS DE DIRECCIÓN DURANTE LA MARCHA MEDIANTE EL USO DE SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS	6
<i>Juan F. Abril, Daniel Planelles, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, José M. Azorín</i>	
MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROLLER BASED ON SLIDING MODE APPROACH	7
<i>Maïssa Farhat, Oscar Barambones, Jose A Ramos, Jose M. Gonzalez de Durana</i>	
Comparación de estrategias de control multivariable sobre el modelo lineal de un aerogenerador de pequeña potencia	8
<i>Sergio Fragoz, Francisco VÁzquez, Juan Garrido, Fernando Morilla</i>	
Casos de uso y mejoras de un robot humanoide de bajo coste	9
<i>Juan Carlos García Sánchez, Javier Felip León, Carlos Veiga Almagro, Pedro J Sanz</i>	

Obtención de los estados de equilibrio de un sistema desconocido mediante su modelado borroso	10
<i>Antonio Javier Barragán Piña, Francisca Segura Manzano, Miguel Ángel Martínez Bohórquez, José Manuel Andújar Márquez</i>	
SUPERVISIÓN, MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN MULTI-ETAPA	11
<i>Mario L. Ruz, Sergio Fragoso, David Rodríguez, Francisco Vazquez, Miguel Zamora</i>	
DETERMINACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE MAPAS DE COBERTURA RASANT EN LA ZONA MARÍTIMA DE CANARIAS	12
<i>J. A. Rodríguez, G. N. Marichal, C. Alonso, I. Padrón, E. Melón</i>	
CONTROL FUZZY DE LA VELOCIDAD DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA	13
<i>Jose A. Cortajarena, Oscar Barambones, Patxi Alkorta, Julián De Marcos</i>	
Décodificación de la Marcha Humana Mediante Señales EEG	14
<i>Joaquín Alcázar, Andrés Úbeda, Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, Jose M. Azorin, José L. Pons</i>	
Aplicación de ICA para la Eliminación de Artefactos Oculares y Mandibulares en Señales EEG durante la Realización de Tareas Mentales	15
<i>Belén López, Andrés Úbeda, Daniel Planelles, Carlos Perez-Vidal, Eduardo Iáñez, Jose M. Azorin</i>	
Estimación de Altura en Aplicaciones de Navegación Topológicas mediante Apariencia Global de Información Visual	16
<i>Francisco Amorós, Luis Paya, David Valiente, Luis Miguel Jiménez, Oscar Reinoso</i>	
SISTEMA DE CONTROL EN RED (SCR) BASADO EN PREDICTOR-OBSERVADOR. ESTUDIO COMPARATIVO CON OTRAS PROPUESTAS DE SCR	17
<i>Angel Cuenca, Pedro García, Pedro Albertos</i>	
CONTROL DE LA TENSIÓN DEL BUS DE CONTINUA DE UN FILTRO ACTIVO DE TIPO PARALELO	18
<i>José Carlos Alfonso Gil, Carlos Ariño, Carlos Bernad Viciano, Hector Beltrán, Emilio Pérez</i>	

Clasificación de respuestas de pulsos de un ADS por análisis discriminante	19
<i>Fernandez Marron Jose Luis, Blazquez Martinez Juan, Barcala Riveira Jose Miguel</i>	
Estimación del par articular generado por Estimulación Eléctrica Neuromuscular mediante un modelo fisiológico simplificado	20
<i>Elisa Piñuela Martín, Antonio J. Del-Ama Espinosa, Ángel Gil Agudo</i>	
ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS LINEALES ANTE FALLOS ESPORÁDICOS	21
<i>Manuel Alejandro Hernandez Mejias, Antonio Sala, Andrés Querol, Carlos Ariño</i>	
Control predictivo no lineal del confort térmico y calidad de aire	22
<i>María Del Mar Castilla, José Domingo Álvarez, Julio Elias Normey Rico, Francisco Rodríguez, Manuel Berenguel</i>	
Diseño de circuitos genéticos en Biología Sintética utilizando optimización multi-objetivo	23
<i>Yadira Boada, Alejandra González, Alejandro Vignoni, Gilberto Reynoso-Meza, Jesús Picó</i>	
Estudio de la aplicación de estimulación eléctrica funcional para la mejora del funcionamiento de interfaces cerebro-computadora	24
<i>Inmaculada Ríos, Enrique Hortal, Javier Gimeno, Jose A. Flores, Jose M. Azorin</i>	
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA MOTORES BLDC	25
<i>Diego Pérez Losada, Joaquín López Fernández, María Santos Fernández</i>	
MODELADO CINEMÁTICO DE UN MANIPULADOR BINARIO HIPER REDUNDANTE PARA APLICACIONES EN CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA (MIS)	26
<i>José Luis González, Javier P. Turiel, Juan C. Fraile, David De La Fuente, Rubén Alonso, Fernando Gayubo</i>	
Un método para modelar sistemas no holónomos con rodaduras	27
<i>Francisco Javier Gil-Chica, Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina</i>	

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN PENDULO MOLAR. APLICACIÓN A LA ESTABILIZACIÓN DE SISTEMAS OSCILATORIOS	28
<i>Manuel Pérez-Molina, Manuel Pérez-Polo, Francisco Javier Gil Chica</i>	
MEJORA DEL RENDIMIENTO DE UN REACTOR CONTINUO EN REGIMEN OSCILANTE GENERADO POR CONTROL PI	29
<i>Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina, Francisco Javier Gil Chica, José Ángel Berná Galiano</i>	
CONTROL PID DE UN SERVOMECANISMO NO LINEAL USANDO LA FUNCION DESCRIPTIVA Y LA BIFURCACION DE BOGDANOV-TAKENS	30
<i>Manuel Pérez-Polo, Manuel Perez-Molina, Francisco Javier Gil Chica, José Ángel Berná Galiano</i>	
Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.	31
<i>Stephan Strahl, Attila Husar, Jordi Riera Colomer, Ramon Costa Castelló</i>	
APLICACIONES EN MATLAB Y SIMULINK PARA EL MODELADO Y CONTROL DEL MOVIMIENTO DE UNA ESTACIÓN ABB IRB-120	32
<i>Miguel Mato, Alberto Herreros, Juan Carlos Fraile, José Luis Sanchez, Enrique Baeyens, Javier Pérez Turiel, Fernando Gayubo</i>	
DISEÑO DE UN ASISTENTE CAMARÓGRAFO PARA TÉCNICAS DE CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA DE PUERTO ÚNICO	33
<i>Irene Rivas Blanco, Belén Estebanez, María Cuevas Rodriguez, Isabel García Morales, Víctor Muñoz</i>	
IMPLEMENTACION DE UNA LIBRERIA EN SIMULINK PARA EL DESARROLLO DE INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR	34
<i>Alberto León, Enrique Hortal, Alberto Rodríguez, José M. Climent, José M. Cano, Jose M. Azorin</i>	
ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE MERCANCÍAS EN LOGÍSTICA MEDIANTE MÚLTIPLES CÁMARAS DE RANGO	35
<i>Pablo Artaso, Gonzalo López-Nicolás</i>	
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO DINÁMICO DE UN CUERPO EN MANIOBRAS DE INMERSIÓN	36
<i>Jose A Somolinos, Amable López, Luis Ramón Núñez, Montserrat Espín</i>	

SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADO A LA MOVILIDAD URBANA	37
<i>Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, Jesus Fernandez-Lozano, Alfonso García-Cerezo</i>	
FLOTA DE VEHÍCULOS AÉREOS PARA FOTOGRAFIA DE ALTA RESOLUCIÓN EN APLICACIONES DE AGRICULTURA DE PRECISION. PROYECTO RHEA	38
<i>Jaime Del Cerro, João Valente, David Sanz, Leandro Cancar, Claudio Rossi, Antonio Barrientos</i>	
Locality-Sensitive Hashing for large scale image retrieval	39
<i>Adrian Sanchez, Enrique Alegre, Victor Gonzalez, Diego Garcia</i>	
Tool wear monitoring in milling using aZIBO shape descriptor	40
<i>María Teresa Garcia-Ordas, Enrique Alegre, Joaquín Barreiro, Diego Garcia-Ordas, Victor Gonzalez-Castro</i>	
Mejorando los sistemas de predicción basados en error acotado	41
<i>José Manuel Bravo Caro, Diego Marín, Manuel Emilio Gegúndez, Teodoro Álamo Cantarero</i>	
Tool wear classification using texture descriptors based on Local Binary Pattern	42
<i>Oscar Garcia-Olalla, Enrique Alegre, Joaquín Barreiro, Laura Fernandez-Robles, Maria Teresa Garcia-Ordas</i>	
Mejora de la Estabilidad en Sistemas Takagi-Sugeno mediante la aplicacion del Teorema de Polya con multiíndices	43
<i>Andrés Querol, Carlos V. Ariño, Manuel A. Hernández-Mejías, Antonio Sala</i>	
SISTEMA ROBOTICO DE TIPO EXOESQUELETO PARA REHABILITACION DE LA MANO	44
<i>Samara Enriquez, Yalena Narvaez, Oscar Andres Vivas, Jorge Diez, Francisco J. Badesa, Jose Maria Sabater, Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estudio de la navegación de un planeador autónomo submarino	45
<i>Edwin Loeff, Juanma Gimenez Martinez, Emilio Garcia Moreno</i>	

SOLAR DESALINATION MANAGEMENT TO FULFILL GREENHOUSE WATER DEMAND USING PREDICTIVE CONTROL	46
<i>Lidia Roca, Jorge A. Sánchez, Francisco Rodríguez, Javier Bonilla</i>	
Control robusto multivariable de un ciclo de refrigeración	47
<i>José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega, Francisco R. Rubio</i>	
SSS-SLAM: An Object Oriented Matlab Framework for Unverwater SLAM using Side Scan Sonar	48
<i>Daniel Moreno, Antoni Burguera, Gabriel Oliver</i>	
INTEGRACIÓN DE SISTEMAS MULTI-AGENTE EN SISTEMAS EMBEBIDOS CON RECURSOS LIMITADOS PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE COORDINACIÓN Y COOPERACIÓN	49
<i>Ángel Soriano, Leonardo Marín, Ángel Valera, Marina Vallés</i>	
OPTIMIZACIÓN DINÁMICA MEDIANTE DIFERENCIACIÓN AUTOMÁTICA USANDO ECOSIMPRO Y CASADI	50
<i>Rubén Martí, Tania Rodríguez, José Luis Pitarch, Daniel Sarabia, César de Prada</i>	
INTEGRACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA DE ASISTENCIA AL CIRUJANO EN OPERACIONES LAPAROSCÓPICAS DE PUERTO ÚNICO	51
<i>Maria Cuevas-Rodriguez, Belen Estebanez, Enrique Bauzano, Irene Rivas-Blanco, Isabel Garcia-Morales, Victor F. Muñoz, Luis D. Lledo, Jose M. Sabater</i>	
Respuesta frecuencial de los sistemas de tiempo discreto usando herramientas interactivas	52
<i>Maria Langoyo Menasanch, Ramon Costa Castelló</i>	
Diseño de dispositivo auxiliar de rehabilitación de mano	53
<i>Jorge Antonio Díez Pomares, Francisco J. Badesa, Ricardo Morales, Jose Maria Sabater Navarro, Nicolas Garcia Aracil, Luis Daniel Lledó</i>	
Algoritmo de Navegación Autónoma basado en una Arquitectura Distribuida	54
<i>Ángel Soriano, Marina Vallés, Ángel Valera, Pedro Albertos</i>	

MODOS ASUMIDOS Y ELEMENTOS FINITOS: COMPARATIVA DE MODELOS PARA ROBOTS FLEXIBLES	55
<i>Pablo Bengoa, Asier Zubizarreta, Aitziber Mancisidor, Itziar Cabanes, Eva Portillo</i>	
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA AEREA PARA LA CAPTACIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA	56
<i>Juan Antonio Rodríguez-Haro, Jose Carlos Moreno, Jose Luis Guzman, Fernando Aguilar, Yolanda Cantón</i>	
CONTROL OF OSCILLATING WATER COLUMN (OWC) WAVE ENERGY PLANTS	57
<i>Aitor J. Garrido, Mikel Alberdi, Izaskun Garrido, Modesto Amundarain</i>	
MODELADO MULTIBODY Y VALIDACIÓN DE UN VEHÍCULO	58
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Charles Pinto, Javier Corral, Itziar Cabanes</i>	
DISEÑO DE UN DISPOSITIVO NEUMÁTICO PARA REHABILITACION DE MANO MEDIANTE FUNDA TERMORETRACTIL	59
<i>Yalena Narváez, Oscar Andrés Vivas, Samara Catalina Enriquez, Jose Maria Sabater-Navarro, Nicolas Garcia, Alvaro Martínez</i>	
Reconstrucción 3D de racimos de uva basada en estéreo-visión	60
<i>Carlos Alberto Molina Toscano, Antonio José Sánchez Salmerón, Eugenio Ivorra Martínez</i>	
CONVERSIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE CADENAS EN VEHÍCULO HÍBRIDO ELÉCTRICO	61
<i>Javier Valbuena, Jesús Morales, Anthony Mandow, Jorge L. Martínez, Alfonso García-Cerezo</i>	
CRITERIOS PARA RESOLUCIÓN DE REDUNDANCIA EN CONTROL VISUAL DIRECTO DE MANIPULADORES	62
<i>Javier Perez, Jorge Pomares, Gabriel J. Garcia, Carlos A. Jara, Fernando Torres</i>	
EQUIPO PARA PRÁCTICAS DE FUNDAMENTOS DE AUTOMÁTICA	63
<i>Alfonso V. Poncela Méndez, Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruíz</i>	
Diseño de un regulador Fuzzy para planta de laboratorio	64
<i>José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Matilde Santos</i>	

CONTROL DE RELOJ DE TORRE CON ARDUINO	65
<i>F. Javier García Ruíz, Eduardo J. Moya de La Torre, Alfonso V. Poncela Méndez</i>	
Reconfiguración de sistemas de control basado en multiagentes	66
<i>Rafael Priego, Unai Gangoiti, Darío Orive, Marga Marcos</i>	
Control de balanceo de carga de un grupo de servidores de red	67
<i>Miquel Talavera-Foix, Carolina Albea</i>	
IMPLEMENTACIÓN DE UNA MAQUETA DE CONTROL BILATERAL DE 1 GDL CON ARDUINO PARA TELERROBÓTICA	68
<i>Adrián Peidro Vidal, Juan José Rodríguez Gil, José María Azorín Poveda, Oscar Reinoso García</i>	
ARQUITECTURA ABIERTA DE CONTROL VISUAL DIRECTO SOBRE FPGA	69
<i>Aiman Alabdo, Gabriel J. Garcia, Jorge Pomares, Fernando Torres</i>	
PROTOTIPO DE ROBOT DE SERVICIO PARA GUIADO DE PERSONAS POR VISIÓN.	70
<i>Abel Martínez, Houcine Hassan, Carlos Domínguez, Pedro López</i>	
A segmentation approach for evaluating wear of inserts in milling machines with computer vision techniques	71
<i>Guillermo Martínez-San-Martín, Laura Fernández-Robles, Enrique Alegre, Oscar García-Olalla</i>	
Optimización de la producción de biomasa en fotobiorreactores tubulares	72
<i>Gustavo Andrade, Daniel Pagano, José Luis Guzmán, Manuel Berenguel</i>	
Avances recientes en manipulación subacuática en el subproyecto GRASPER	73
<i>Antonio Peñalver, Jose J. Fernández, Javier Pérez, Jorge Sales, Juan C. García, David Fornas, Raul Marín, Pedro J. Sanz</i>	
Printbots: un gran paso hacia adelante	74
<i>Leopoldo Armesto, Andrés Conejero, Miguel Fernández, Pedro Fuentes, David Perry, Enrique Martínez, Vicente Marhuenda, Carles Igual, Carlos De La Fuente, Oihan Elesgaray</i>	

TRANSFERENCIA DE COMPORTAMIENTOS DE NAVEGACION HUMANA A UN PLANIFICADOR LOCAL DE ROBOTS	75
<i>Rafael Ramón-Vigo, Noé Pérez-Higueras, Luis Merino, Fernando Caballero</i>	
DESARROLLO METODOLÓGICO DE SISTEMAS DE CONTROL APLICANDO INGENIERÍA CONDUCTIDA POR MODELOS	76
<i>María Luz Alvarez, Arantzazu Burgos, María Isabel Sarachaga, Elisabet Estévez, Marga Marcos</i>	
Plataforma para la implementación y validación de algoritmos de control de tiempo real en mini-helicópteros de varios rotores	77
<i>Luis Ródenas, Ricardo Sanz, Pablo Albiol, Alberto Castillo, Daniel Verdú, Pedro García</i>	
PLATAFORMA PARA LA FORMACIÓN PRÁCTICA INDIVIDUALIZADA EN FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO	78
<i>Carlos Sánchez Cazorla, David Muñoz de La Peña, Fabio Gómez-Estern</i>	
Primeros resultados de un control genético predictivo sobre maqueta de helicóptero (twinrotor)	79
<i>Asier Gutierrez, Eloy Irigoyen, Ekaitz Larzabal, Juan José Valera, Mikel Larrea</i>	
MODELADO DE MOTORES USM PARA ROBOTICA DE REHABILITACION	80
<i>Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Fernando Martin Monar, Dolores Blanco</i>	
SEMANTIC ENVIRONMENT FORMALIZATION FOR MOBILE ROBOTS NAVIGATION	81
<i>Eduardo Munera Sánchez, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Jose-Luis Poza-Luján, Jose E. Simó Ten, J. Francisco Blanes Noguera</i>	
Seguimiento de caminos para formaciones de vehículos marinos de superficie	82
<i>Jesus M. de La Cruz Garcia, José A. López-Orozco, Eva Besada-Portas, David Moreno Salinas, Joaquín Aranda Almansa</i>	
SIMULACION DE LA MANO HUMANA MEDIANTE MATLAB/SIM-MECHANICS	83
<i>Dorin Sabin Copaci, Juan Carlos Garcia Pozo, Antonio Flores Caballero, Dolores Blanco</i>	

Mejora de la localización de un cuadricóptero mediante la fusión de su sistema de metrología y un GPS	84
<i>José Luis Racero Robles, Santiago Sastre, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó</i>	
Optimización en dos etapas para la gestión energética en edificios	85
<i>Jorn K. Gruber, Francisco Huerta, Pablo Matatagui, Milan Prodanovic</i>	
SOFTWARE PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE CREACIÓN DE MAPAS Y LOCALIZACIÓN VISUAL DE UN ROBOT MÓVIL	86
<i>Luis Paya, Francisco Amoros, Arturo Gil, Lorenzo Fernandez, Oscar Reinoso</i>	
CPWalker - Plataforma robótica para la rehabilitación y el entrenamiento de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral	87
<i>Rafael Raya, Óscar Ramírez, María Dolores Del Castillo, José Ignacio Serrano, Angel Iglesias, Ramón Ceres, Eduardo Rocon, Fernando Mollá, Juan Manuel Belda, Rakel Poveda, Amparo López, Ignacio Martínez, Sergio Lerma, Teresa Martín</i>	
Control Supervisor para el Control De Sistemas de Fabricación Reconfigurables	88
<i>Francisco Javier Lastra Santos, Jesús Ángel Trujillo Medina, Elías Revestido Herrero, José Ramón Llata García, Francisco Jesús Velasco González</i>	
Navegación local de un robot móvil con costes sociales aprendidos por demostración	89
<i>Noé Pérez-Higueras, Rafael Ramón-Vigo, Fernando Caballero, Luis Merino</i>	
CONTROLADOR RESETEADO DE DESLIZAMIENTO DE RUEDAS PARA SISTEMAS DE FRENADO	90
<i>Emma Delgado, Antonio Barreiro, Miguel Díaz-Cacho, Pablo Falcón</i>	
GENERACIÓN Y REPRODUCCIÓN DE SOMBRAS EN TIEMPO REAL EN EASY JAVA SIMULATIONS	91
<i>Francisco J. García, Carlos A. Jara, Francisco A. Candelas, Fernando Torres, Francisco Esquembre</i>	

Planificación de rutas para la cobertura de un área en tiempo mínimo mediante un sistema Multi-UAV	92
<i>Ernesto Santana, Romualdo Moreno, Miquel Piera</i>	
Diseño de control no lineal para regulación de tasa de crecimiento en cultivos multi-sustrato	93
<i>Sebastián Nuñez, Fabricio Garelli, Hernán De Battista, Jesús Picó</i>	
Localización de objetos 3D con ambigüedad de vista en tareas de guiado robótico	94
<i>Carlos M. Mateo, Pablo Gil, Fernando Torres</i>	
INTEGRACIÓN DE RECONOCIMIENTO DE ESCENAS Y LOCALIZACIÓN BASADA EN MONTE CARLO	95
<i>Javier Perez, Fernando Caballero, Luis Merino</i>	
DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DISTRIBUIDO EN ROBOTS MÓVILES SOBRE EL MIDDLEWARE DEL NÚCLEO DE CONTROL	96
<i>Josep Tormo, Raúl Simarro Fernández, Eduardo Munera, José E. Simó Ten, Juan-Luis Posadas-Yagüe</i>	
ENFOQUE UNIFICADO DEL DISEÑO DE PID MEDIANTE EL LUGAR DE LAS RAÍCES Y EN FRECUENCIA	97
<i>Roberto Sanchis Llopis, Ignacio Peñarrocha Alós, Julio Ariel Romero Pérez</i>	
HERRAMIENTA DE SIMULACION PARA EL DESARROLLO DE EXOESQUELETOS BASADA EN MATLAB-SIMULINK	98
<i>Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Dolores Blanco, Luis Moreno</i>	
Reconstrucción cinemática del brazo humano mediante matrices de transformación	99
<i>José María Catalán Orts, Ricardo Morales Vidal, Luis Daniel Lledó, José María Sabater Navarro, Nicolás García Aracil, Jorge Antonio Díez</i>	
Diseño e implementación de una plataforma experimental para el control de vuelo, gestión y visualización de datos de UAVs	100
<i>Santiago Sastre, José Luis Racero Robles, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó</i>	

Configuración y ejecución de benchmarks de intervención robótica submarina en UWSim mediante herramientas Web	101
<i>Javier Pérez Soler, Jorge Sales, Raul Marín, Enric Cervera, Pedro J. Sanz</i>	
SISTEMA DE CONTROL DE HELICÓPTEROS MEDIANTE FIJACIÓN POR CABLE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE LAS VARIACIONES DE LA GUIÑADA EN VUELO ESTACIONARIO	102
<i>Álvaro Caballero, Manuel Béjar, Aníbal Ollero</i>	
AJUSTE DE CONTROLADORES PID BASADOS EN EVENTOS POR CUANTIFICACIÓN Y CRUCE DE NIVELES	103
<i>Julio Ariel Romero, Roberto Sanchis Llopis, Ignacio Peñarrocha</i>	
Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Entorno para Usuarios con Parálisis Cerebral	104
<i>Miguel Velasco, Alejandro Clemotte, Rafael Raya, Ramón Ceres</i>	
ESTIMACIÓN DE PARAMETROS DE UN MODELO DE MANIOBRA NO LINEAL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO	105
<i>Elías Revestido Herrero, Francisco Javier Lastra Santos, Francisco J. Velasco González, José María Riola Rodríguez, Juan Jesús Díaz Hernández, Luis Manuel Vega Antolín</i>	
Desarrollo de un sensor subacuático ultrasónico y RF para posicionamiento en tareas de manipulación robótica	106
<i>Diego Centelles, Jorge Sales, Raul Marín, Jose Vte. Martí, David Fornas, Pedro J Sanz</i>	
SLAM VISUAL HÍBRIDO TOPOLÓGICO-MÉTRICO MEDIANTE MÉTODOS BASADOS EN LA APARIENCIA GLOBAL	107
<i>Lorenzo Fernandez, Luis Paya, Arturo Gil, Adrian Peidro, Oscar Reinoso</i>	
NORMA IEC-61499 PARA EL CONTROL DISTRIBUIDO. APLICACIÓN AL CNC.	108
<i>Esteban Querol, Julio A. Romero, Antonio M. Estruch, Fernando Romero</i>	
MPC tuning in a hierarchical control structure for a wastewater treatment process	109
<i>Ignacio Santin, Carles Pedret, Ramon Vilanova</i>	

CONTROL JERÁRQUICO DE PLANTA COMPLETA DE UN CASO DE ESTUDIO DE CRISTALIZACIÓN DE AZÚCAR <i>Rogelio Mazaeda, Smaranda Cristea, César de Prada</i>	110
Analysis of controller performance in wastewater treatment <i>Jean Carlos Malca, Ramon Vilanova</i>	111
Entorno de desarrollo integrado para robots mini-humanoides basado en modelado por componentes <i>Félix R. Cañadillas, Marcos Arjonilla Viñaras, Alberto Jardón Huete</i>	112
Métodos bio-inspirados en el control PID de un motor <i>Jacobo Sáenz Valiente, Matilde Santos Peñas</i>	113
Diseño de una plataforma híbrida aéreo-terrestre para aplicaciones de inspección visual <i>Joan Pep Company, Alberto Ortiz</i>	114
Algoritmo para particionado automático de sistemas con criticidad mixta <i>Emilio Salazar, Alejandro Alonso, Salvador Trujillo</i>	115
ENFOQUE ESTRATÉGICO PARA EL PROBLEMA PEG-IN-HOLE UTILIZANDO PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS <i>Fares Abu-Dakka, Mohamed Abderrahim</i>	116
Gliif: Beyond QR Codes <i>Oscar Deniz Suarez, Jose M. Gutierrez, Jesus Salido, Gloria Bueno, Alan Bologlu</i>	117
VERIFICACION Y VALIDACION DE SISTEMAS DE CONTROL DE VUELO PARA MAV-VTOL BASADAS EN MATLAB STATEFLOW <i>Pablo Rodriguez Diaz, Jesús G. Villagómez, Manuel Vargas Villanueva, Francisco R. Rubio</i>	118
SENSORY PROCESSING OPTIMIZATION IN A SMART DEVICE <i>Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera Sanchez, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Raul Simarro</i>	119

CABEZA MECATRÓNICA CON INTELIGENCIA EMOCIONAL Y ARTIFICIAL	120
<i>Sheila Lucero Sánchez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo</i>	
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PARA LA DINÁMICA SINÁPTICA DE UN SISTEMA NEURONAL BASADOS EN REDES DE PETRI Y MÁQUINAS DE ESTADOS	121
<i>Martin Bogdan, Karim El-Laithy, Juan Ignacio Latorre, Emilio Jimenez</i>	
ESTIMACIÓN MONOCULAR Y EFICIENTE DE LA POSE USANDO MODELOS 3D COMPLEJOS	122
<i>Antonio Rubio Romano, Michael Villamizar, Luis Ferraz Colomina, Alberto Sanfeliu Cortés, Francesc Moreno Noguer, Adrián Peñate-Sánchez</i>	
Alternativas de biología sintética para el control de rutas metabólicas	123
<i>Pavel Zach, Alejandro Vignoni, Daniel Georgiev, Jesús Picó</i>	
Uso de Simulink y Arduino para Prácticas de Robótica	124
<i>Juan Gil Lozano, Antonio Muñoz Ramírez, Víctor Eugenio Torres López, Jesus Gomez</i>	
CONFIGURATION MODEL FOR CONTROL KERNEL MIDDLEWARE BASED APPLICATIONS	125
<i>Jose L. Beltran, Lorena Calabuig, Eduardo Munera, Jose Simo, Jose-Luis Poza-Luján</i>	
NAVEGACIÓN REACTIVA EN ENTORNOS ESTRECHOS E INTRINCADOS	126
<i>Javier Antich Tobaruela, Alberto Ortiz Rodríguez</i>	
Control de Movimientos mediante Bus EtherCAT y LinuxCNC	127
<i>Ignacio Rosales González, Víctor Eugenio Torres López, Jesus Gomez</i>	
Survey on Progressive Image Compression, Transmission, its application in Underwater Intervention Missions	128
<i>Eduardo Moscoso, Raul Marín, Jorge Sales, Pedro J. Sanz</i>	

MARCO PARA EL ANÁLISIS DE COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN 3D OBTENIDA CON ESCÁNERES LÁSER	129
<i>Pilar Merchán, Santiago Salamanca, Antonio Adán, María José Gómez</i>	
Implementación de controladores PID y su Optimalidad en el espacio de objetivos	130
<i>Helem Sanchez, Ramon Vilanova</i>	
MÉTODO DE LOCALIZACIÓN PRECISA DE PUPILAS EN IMÁGENES A COLOR	131
<i>J. Enrique Sierra, Matilde Santos</i>	
Octree-Based Subsampling Criteria for Bathymetric SLAM	132
<i>Albert Palomer, Pere Ridao Rodriguez, David Ribas Romagos, Guillem Vallicrosa</i>	
OPERACIÒN OÌPTIMA DE LA PLANTA DE LOS 4 TANQUES	133
<i>Mauricio Alva Howes, Alejandro García Delgado, Néstor García Hidalgo, Ramon Costa Castelló</i>	
Nonlinear Predictive Control for the Four-Tanks Plant Flow Regulation	134
<i>Juan Acevedo, Julio Luna, Noè Rosanas</i>	
Estudio de escenarios de uso para un robot social asistencial para enfermos de Alzheimer	135
<i>Miguel A. Salichs, Esther Salichs, Irene P. Encinar, Álvaro Castro-González, María Malfaz</i>	
Extrusor Multifilamento para Impresión 3D en Color	136
<i>Víctor Andueza García, Jesús Manuel Gómez de Gabriel</i>	
Concurso en Ingeniería de Control 2014. Operación Óptima de la planta de 4 tanques. Control multivariable.	137
<i>Alberto Pajares Ferrando, Francesc Xavier Blasco Ferragud</i>	
CONTROL PREDICTIVO PARA LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS POR LOTES EN LA INDUSTRIA AZUCARERA	138
<i>Alexander Rodriguez, Luis Felipe Acebes, Cesar De Prada, Rogelio Mazaeda</i>	

DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE OBJETOS MÓVILES UTILIZANDO UN ESCÁNER LÁSER MEDIANTE FILTROS DE KALMAN	139
<i>Marc Bosch Jorge, Angel Soriano, Ángel Valera, Antonio J. Sánchez Salmerón</i>	
Control of a Quadruple Tank Process using a Mixed Economic, Standard MPC	140
<i>Adrià Soldevila, Julen Cayero, Jean Carlo Salazar, Damiano Rotondo, Vicenç Puig</i>	
PROPUESTA DE ONTOLOGÍA PARA EL CONTROL DE ENTORNOS EXTERIORES	141
<i>Miguel Juan-Monter, Jose-Luis Jimenez-Garcia, Jose-Luis Poza-Luján, Eduardo Munera, Raúl Simarro Fernández</i>	

SLAM VISUAL HÍBRIDO TOPOLÓGICO-MÉTRICO MEDIANTE MÉTODOS BASADOS EN LA APARIENCIA GLOBAL

L. Fernández, L. Payá, A. Gil, A. Peidró, O. Reinoso
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad Miguel Hernández. Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche (Alicante), Spain
l.fernandez@umh.es, lpaya@umh.es

Resumen

En este trabajo se propone un método basado en la apariencia global de escenas para detectar cierres de ciclo en un proceso de SLAM visual (Simultaneous Localization and Mapping). Para resolver este problema, hacemos uso de imágenes omnidireccionales capturadas por un robot en un entorno interior y de su odometría interna. Para describir las escenas hacemos uso de métodos basados en la apariencia global. Durante el proceso de SLAM, se construyen dos mapas del entorno, uno métrico y otro topológico, con relaciones entre ellos. Estas relaciones son actualizadas en cada iteración de nuestro algoritmo. El mapa topológico es un grafo construido a partir de la información de apariencia de las escenas. Se añade un nuevo nodo cuando la nueva información visual es suficientemente distinta de la información previa. Al mismo tiempo, comprobamos un posible cierre de ciclo topológico con los nodos previos. Por otro lado, estimamos la posición métrica de la nueva pose usando un enfoque Monte-Carlo con el objetivo de construir un mapa métrico. Los resultados experimentales demuestran la validez del método.

Palabras clave: Descriptor de apariencia visual global, visión omnidireccional, SLAM, Mapa híbrido topológico-métrico, detección de cierre de ciclo.

1. INTRODUCCIÓN

La creación de mapas y localización de forma simultánea (SLAM) ha recibido gran atención en los últimos años, y constituye un paso fundamental para el diseño de robots móviles autónomos. Las técnicas de SLAM consideran la situación en la que un vehículo autónomo construye un mapa de un entorno desconocido a la vez que utiliza este mapa para estimar su posición. Podemos afrontar el problema de SLAM desde tres enfoques distintos: SLAM topológico, que representa la posición del robot mediante una lista de estados, de modo que el mapa está compuesto por una lista de localizaciones y relaciones de conectividad espacial entre ellas [7]; SLAM métrico, que incluye en

el mapa un conjunto de poses del robot junto con relaciones métricas entre ellas, de modo que la posición del robot en el mapa puede ser estimada con precisión geométrica [5]; y SLAM híbrido topológico/métrico, que combina la eficiencia computacional de los mapas topológicos con la precisión y nivel de detalle de los métricos [14].

Actualmente, es habitual que las técnicas de SLAM hagan uso de visión por computador para construir el mapa y estimar la posición del robot. Estos problemas pueden afrontarse desde dos puntos de vista. En primer lugar, los métodos basados en la extracción de características consisten en extraer, describir y seguir a lo largo de un conjunto de escenas ciertos puntos o regiones de interés (como SIFT o SURF) [15]. En segundo lugar, los métodos basados en la apariencia tratan de crear una base de datos que contiene un único descriptor de apariencia global por escena (usando, por ejemplo, análisis de Fourier, de componentes principales, etc.) [10, 2].

En este trabajo presentamos un marco unificado para llevar a cabo SLAM híbrido métrico-topológico, afrontando el problema de SLAM como un problema de estimación discreta (SLAM topológico) y un problema continuo (SLAM métrico).

Para que el proceso de SLAM sea capaz de construir un mapa correcto del entorno, es fundamental implementar un algoritmo de detección de cierre de ciclos. Es necesario que el robot sea capaz de decidir si la actual posición ha sido previamente visitada. Para resolver este problema de forma eficiente, resulta fundamental una elección adecuada del método para describir las escenas y una optimización del problema de asociación de datos [6, 17]. La representación de las escenas es uno de los puntos cruciales. En este trabajo hacemos uso de un descriptor de apariencia global para describir las escenas capturadas por el robot en cada iteración. Además, llevamos a cabo el proceso de cierre de ciclo cuando la apariencia de la escena actual es suficientemente similar a un escena previamente capturada.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente forma: la sección 2 introduce el método utilizado

para construir el grafo topológico. A continuación, en la sección 3 se describe el algoritmo implementado para construir el mapa híbrido. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la sección 4. Finalmente, el apartado 5 muestra las conclusiones del trabajo y las líneas de investigación futuras.

2. CONSTRUCCIÓN DE UN MAPA TOPOLÓGICO TIPO GRAFO

2.1. DESCRIPTOR DE APARIENCIA GLOBAL

Para crear el mapa topológico haremos uso de la apariencia global de las escenas omnidireccionales. De este modo, es necesario construir un descriptor por escena que represente la información contenida en la misma en su conjunto. Este descriptor debería retener tanta información como sea posible con un tamaño relativamente bajo, el coste computacional necesario para su cálculo debería ser razonable y por último, debería ser robusto ante cambios en las condiciones de iluminación del entorno. Por estos motivos, haremos uso de dos descriptores que han demostrado capacidad para describir correctamente las escenas y compararemos su desempeño. Estos descriptores son la Firma de Fourier [8, 9] y el Histograma de Orientación del Gradiente (HOG) [1, 3].

2.2. SLAM TOPOLÓGICO

El enfoque híbrido que proponemos para la creación del mapa consiste, en primer lugar, en describir el entorno de manera topológica, haciendo uso de un grafo. Cada nodo representa un área del entorno y contiene una o varias imágenes que poseen una apariencia visual similar. Por su parte, los enlaces indican las relaciones de conectividad espacial entre nodos [11]. Para calcular la imagen más representativa de cada nodo, calculamos la similitud entre cada par de imágenes del nodo, $S(i, j)$ mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$S(i, j) = \frac{1}{D(i, j)}$$

$$D(i, j) = \sqrt{\sum_m \sum_n (FS_i(m, n) - FS_j(m, n))^2} \quad (1)$$

Donde FS_i es el descriptor de la imagen panorámica I_i y m y n son el número de componentes que tiene el descriptor en filas y columnas respectivamente. De este modo, cuando más cercanas (similares) son las imágenes, menor es la distancia

D y mayor es la similitud S . Una vez que se ha calculado la similitud entre cada par de imágenes, se calcula la imagen representativa mediante las siguientes expresiones:

$$R = \arg \max_{i \in P} \left(\min_{j \in P, i \neq j} (S(i, j)) \right)$$

$$N_R = \max_{i \in P} \left(\min_{j \in P, i \neq j} (S(i, j)) \right) \quad (2)$$

Donde P representa el conjunto de nodos del grafo. R es la imagen que mejor representa la información contenida en el nodo y N_R es su factor de similitud mínimo.

Cada vez que el robot captura una nueva imagen I , comprueba si esta imagen es parte de la región definida por el nodo actual, usando para ello la imagen representativa de dicho nodo R . Si la similitud S está por encima de cierto umbral (Th), se añade la imagen al nodo actual. Sin embargo, si la similitud no supera el umbral, se compara con las imágenes representativas de los nodos vecinos al actual, y se selecciona el nodo con la mayor similitud (cierre de ciclo). Para ello, se hace uso de un nuevo umbral (Th_{nei}) menor que el anterior, para dar prioridad a los nodos vecinos. En el caso en que la similitud no exceda este umbral vecino, la imagen se compara con las representativas del resto de nodos, y si supera el umbral mínimo (Th) se añade al nodo correspondiente (cierre de ciclo). Finalmente, en caso de que no se encuentre ninguna correspondencia, se añade un nodo nuevo al grafo y, consecuentemente, se añade un enlace entre el nuevo nodo y el anterior. Por otro lado, cada vez que añadimos una imagen a un nodo existente, si $Th \leq S(i, j) \leq N_R$, se recalcula la imagen representativa de dicho nodo. Estos umbrales han sido ajustados de forma empírica según el tipo de entorno en que navega el robot.

3. SLAM MÉTRICO

Desde el punto de vista métrico, el algoritmo propuesto estima la posición y orientación del robot respecto a un sistema de referencia con precisión geométrica. La propuesta que presentamos consiste en un SLAM visual basado en un trabajo previo [16], en el que desarrollamos una odometría visual para estimar la trayectoria seguida por un robot haciendo uso únicamente de la información suministrada por una cámara. En el presente trabajo, hacemos uso de esta información visual en combinación con la odometría interna del robot para calcular un mapa híbrido topológico-métrico del entorno. Para ello, nos inspiramos en el enfoque de fastSLAM [10], pero con ciertos cambios relevantes. Combinaremos un algoritmo de localización

Monte Carlo (MCL) con un proceso de estimación de marcas, de modo que el robot podrá decidir cuándo su posición actual se incluye como una nueva marca en el mapa métrico. Cada una de estas marcas será un descriptor de apariencia global de una escena (apartado 2.1).

3.1. ALGORITMO MONTE CARLO

El enfoque que hemos usado para implementar la localización del robot móvil está basado en un proceso Monte Carlo que presenta algunas diferencias con la formulación tradicional. El objetivo consiste en estimar la pose del robot $x_t = (x, y, \theta)$ en el instante t usando un conjunto de medidas $z_{1:t} = \{z_1, z_2, \dots, z_t\}$ del entorno y de movimientos $u_{1:t} = \{u_1, u_2, \dots, u_t\}$ del robot [4]. En la localización Monte Carlo [13], la función densidad de probabilidad $p(x_t|z_{1:t}, u_{1:t})$ se representa con un conjunto de M muestras aleatorias $\chi_t = x_t^i, i = 1 \dots M$ denominadas partículas. Podemos interpretar cada partícula como una hipótesis de la verdadera posición del robot $x_t^i = (x^i, y^i, \theta^i)$. El conjunto de partículas define una función de probabilidad discreta que aproxima a la distribución continua, en la que el peso de cada partícula determina su importancia relativa.

El algoritmo Monte Carlo tradicional consta de tres fases: *Fase de predicción*, en la que se genera un conjunto de partículas $\bar{\chi}_t$ a partir del conjunto anterior χ_{t-1} y de la señal de control u_t ; *Fase de actualización*, en la que se hace uso de la observación z_t para calcular el peso w_t^i de cada partícula en el conjunto $\bar{\chi}_t$ y *Fase de remuestreo*, en la que se calcula el conjunto resultante χ_t . Finalmente, el conjunto χ_t representa la distribución $p(x_t|z_{1:t}, u_{1:t})$. En nuestro caso (SLAM), dado que comenzamos el experimento sin disponer de un mapa del entorno, el conjunto inicial de partículas se representa por un conjunto de muestras tomadas a partir de una distribución Gaussiana estrecha centrada en la posición inicial ($x = 0, y = 0$). Cuando el experimento comienza, la primera marca (l_0) corresponde con el descriptor de la escena capturado desde la primera pose del robot (X_0) y cuando el robot se mueve y captura una nueva imagen, el conjunto de partículas de la pose inicial también se mueve, añadiendo cierto error al movimiento de cada partícula, teniendo en cuenta el movimiento del robot $u_{1:t} = \{u_1, u_2, \dots, u_t\}$.

Por su parte, el algoritmo topológico calcula la pose representativa del nodo cada vez que se añade una nueva imagen, y esta aparecerá en el mapa métrico como el conjunto de partículas que representa la localización métrica del nodo. Aunque se calcula cada conjunto de partículas que representa cada movimiento del robot, únicamente se añade

al mapa métrico el conjunto de partículas que representa al nodo. La principal diferencia respecto al algoritmo MCL tradicional es que no llevamos a cabo un proceso de actualización y remuestreo en cada movimiento del robot, sino únicamente cuando el algoritmo topológico detecta un cierre de ciclo. Por otro lado, llevamos a cabo una fase de predicción en cada movimiento del robot.

El proceso de actualización y remuestreo se activa cuando se detecta un cierre de ciclo métrico. El peso de cada partícula $w_t^i = p(z_t|x_t^i)$ que representa la pose actual del robot (p_t) se calcula haciendo uso tanto de la información métrica (distancia métrica) como de la información visual (distancia en el espacio de la apariencia) a través de la siguiente expresión:

$$\omega_t^i = \exp\{-v_i \Sigma_l^{-1} v_i^T\} \exp\{-h_j \Sigma_d^{-1} h_j^T\} \quad (3)$$

Donde v_i es la diferencia entre la posición de la marca l_j y la posición (x_i, y_i) de la partícula i ($v_i = (l_x^j, l_y^j) - (x^i, y^i)$). Σ_l es una matriz diagonal $\Sigma_l = \text{diag}(\sigma_l^2, \sigma_l^2)$ en la que se ha elegido la varianza σ_l^2 para minimizar el error en localización del robot. $h = |d_j - d_t|$ es la diferencia entre el descriptor de apariencia asociado con la imagen observada actualmente y el descriptor asociado con la marca l_j . El conjunto resultante χ_t se calcula mediante remuestreo con sustitución a partir del conjunto $\bar{\chi}_t$, donde la probabilidad de remuestrear cada partícula es proporcional a su peso w_t^i .

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el propósito de evaluar nuestra propuesta de SLAM híbrido métrico-topológico, hemos llevado a cabo un experimento haciendo uso de un robot móvil en un entorno de laboratorio, bajo condiciones de trabajo reales. En primer lugar, hemos capturado los datos necesarios y, a continuación, hemos llevado a cabo varios conjuntos de experimentos, variando los principales parámetros del algoritmo, para tratar de ajustar los valores óptimos. La figura 1 muestra una vista en planta del entorno. Se trata de un entorno de trabajo real y desafiante, por el alto nivel de *aliasing visual* que presenta, por los cambios de iluminación y por el tránsito de personas que caminan cerca del robot. Se muestra la ruta seguida por el robot para capturar los datos necesarios para comprobar el desempeño de nuestro algoritmo (puntos verdes). También se muestran algunos ejemplos de imágenes capturadas a lo largo de esta ruta, y el punto inicial y final (punto azul grande). La ruta presenta varios cierres de ciclo.

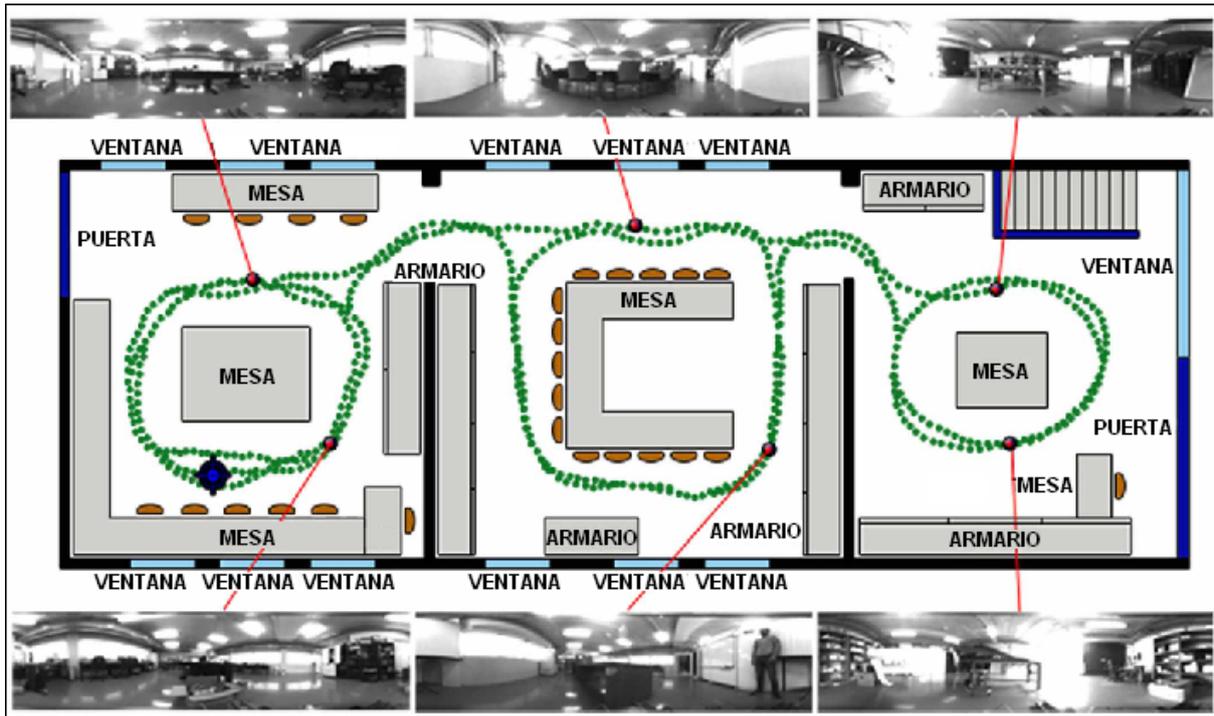


Figura 1: Vista en planta del entorno en que se han llevado a cabo los experimentos.

Para evaluar el desempeño del método, necesitamos un mecanismo que nos permita calcular cómo de similar es la forma del mapa resultante respecto a la forma del mapa real (trayectoria de la figura 1). Dado que comenzamos sin ningún conocimiento previo acerca de la forma del mapa real, esperamos que el mapa resultante tenga una forma similar al mapa real, salvo cierta rotación. Teniendo en cuenta este detalle, hemos decidido hacer uso del análisis de Procrustes [12] para comparar el mapa obtenido con el real. Este análisis nos proporciona una medida de similitud entre la forma del conjunto de *landmarks* obtenido tras el proceso de SLAM (conjunto A) y su distribución real (conjunto B). Como resultado del proceso, obtenemos un parámetro $\mu \in [0, 1]$, donde μ es una medida de la similitud de forma entre los conjuntos de puntos A y B , de modo que un valor pequeño de μ , indica que los conjuntos A y B son similares. En el presente trabajo llamaremos *diferencia de forma* al factor μ . Este análisis se realiza únicamente a efecto comparativos, para conocer el funcionamiento del algoritmo implementado, y se toma como referencia la ruta real (calculada a partir de medidas láser) seguida por el robot. Cabe destacar que en una aplicación real, se desconocería esta ruta real.

Usando como entrada el conjunto de datos adquirido previamente por el robot en el escenario real, hemos llevado a cabo una experimentación exhaustiva. Hemos implementado nuestro algoritmo haciendo uso de la odometría visual calculada

y de dos descriptores distintos de apariencia visual global. La odometría visual se usa como entrada para la fase de predicción del algoritmo de localización Monte Carlo. En los experimentos hemos testado la influencia del número de partículas en la forma del mapa calculado. Hemos hecho uso de la diferencia de forma μ para evaluar la bondad del mapa resultante (métrico). En la figura 2 se muestra el factor μ y el tiempo por iteración t que requiere la ejecución del algoritmo, dependiendo del número de partículas tomadas en el algoritmo Monte Carlo. Se muestran los resultados obtenidos con ambos descriptores.

Como se puede apreciar en ambos casos, según incrementamos el número de partículas, la diferencia de forma disminuye. Sin embargo, alcanza un valor mínimo a partir del cual esta disminución es prácticamente inapreciable. En el caso de la Firma de Fourier, el valor mínimo que se obtiene para μ es igual 0,096 usando 2000 partículas. En el caso de HOG, el mínimo se obtiene cuando usamos 4000 partículas, y su valor es $\mu = 0,097$. Respecto al tiempo de cálculo, se trata de un factor importante puesto que indica si el proceso se podría llevar a cabo o no en tiempo real. Observamos como el tiempo por iteración se incrementa cuando lo hace el número de partículas.

Comparando ambos métodos de descripción, en general, en el caso de la Firma de Fourier, μ toma un menor valor que en el caso de HOG (excepto cuando tomamos un número muy alto de partícu-

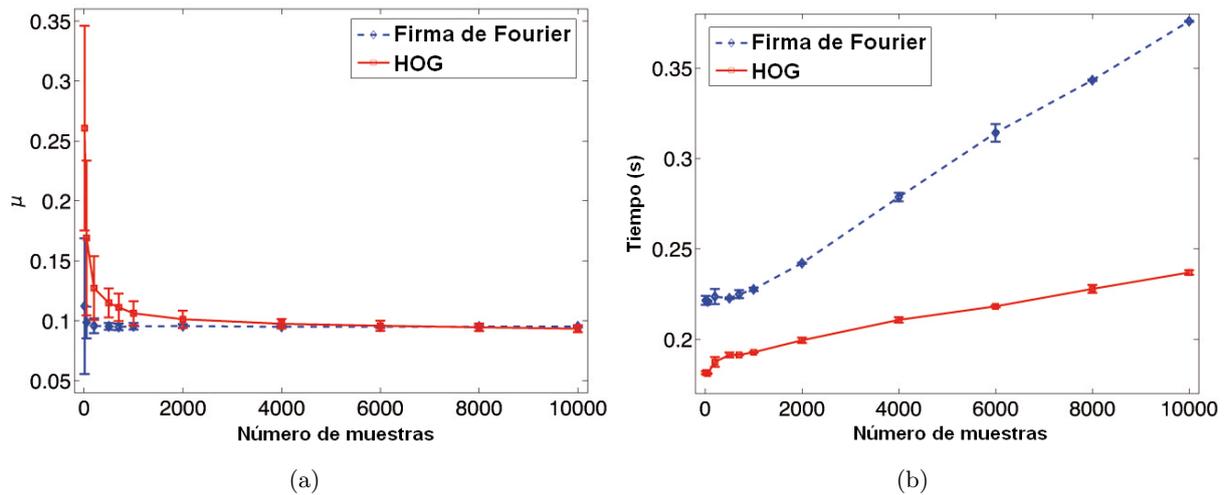


Figura 2: (a) Diferencia de forma μ según el número de partículas utilizando la Firma de Fourier (línea azul) y HOG (línea roja). (b) Tiempo de procesamiento por iteración durante la construcción de mapa dependiendo del número de partículas utilizando la Firma de Fourier (línea azul) y HOG (línea roja).

las, cuando μ es ligeramente mayor en el caso de la firma de Fourier). Por su parte, el tiempo siempre es menor cuando usamos como descriptor HOG, aunque cabe destacar que ambos descriptores nos permitirían trabajar en tiempo real manteniendo una buena precisión en el mapa generado si usamos un número de partículas intermedio, en torno a 2000.

La figura 3 muestra un ejemplo de resultado experimental obtenido al usar 2000 partículas y (a) la Firma de Fourier y (b) HOG. Las partículas que muestran la posición de las marcas se representan como puntos verdes, y la posición de estas marcas es representada como cruces azules. Las partículas que representan la posición actual del robot se muestran como puntos rojos y su posición es representada como un círculo verde. La odometría interna se representa con una línea azul en la que los cuadrados azules representan la posición actual del robot de acuerdo con la odometría interna. La odometría visual se representa como una línea roja en la que los cuadrados rojos representan la posición del robot según la odometría visual. Finalmente, la trayectoria real seguida por el robot (*ground truth*) se representa como una línea negra donde los cuadrados negros representan las posiciones del robot.

Estas figuras nos muestran como, en ambos casos, el mapa obtenido mediante el algoritmo propuesto es más preciso que el mapa obtenido haciendo uso únicamente de los datos de odometría interna del robot. Se puede apreciar además como, en el caso de la Firma de Fourier, la posición inicial y final del robot son prácticamente coincidentes en el mapa calculado con nuestro método, que es lo

que ocurre en el mapa real. En el caso de HOG, aunque estas posiciones no coinciden, son más cercanas entre ellas que en el caso del mapa calculado con la odometría del robot.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo hemos presentado un método de SLAM visual. Para resolver este problema hemos hecho uso de la apariencia global de imágenes panorámicas en combinación con la odometría interna del robot. Hemos desarrollado un algoritmo híbrido métrico-topológico para construir el mapa métrico, para mantener un grafo topológico y para detectar los cierres de ciclo. Los experimentos se han llevado a cabo con un conjunto de escenas omnidireccionales capturadas mediante un sistema catadióptrico montado sobre el robot móvil en un entorno de trabajo interior real.

En los experimentos, hemos testado este enfoque híbrido, usando tanto la Firma de Fourier como Histograma de Orientación del Gradiente como descriptores de la apariencia global de las escenas. Cuando ajustamos correctamente los parámetros del algoritmo, conseguimos un mapa correcto con ambos tipos de descriptores. Además, los experimentos demuestran como necesitamos un número relativamente pequeño de partículas para conseguir una precisión aceptable en ambos casos. Hemos presentado resultados detallados de los experimentos realizados cuando usamos un número de partículas igual a 2000 con ambos descriptores. Estos resultados experimentales demuestran la validez del algoritmo. La precisión de la Firma

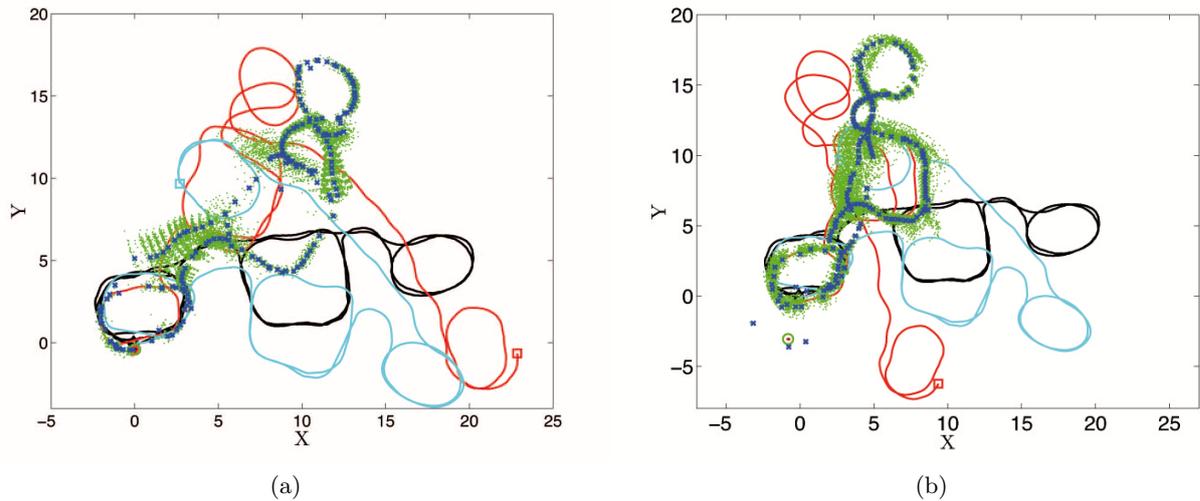


Figura 3: Ejemplo de un experimento usando un número de partículas igual a 2000 y descriptor (a) Firma de Fourier y (b) HOG.

de Fourier supera a los resultados obtenidos con HOG. Sin embargo, HOG requiere un menor coste computacional. Dado que ambos métodos nos permiten trabajar en tiempo real, llegamos a la conclusión de que la Firma de Fourier es el mejor de ambos métodos para resolver este tipo de tareas.

Los trabajos futuros incluirían el desarrollo de un nuevo método para extraer más información del proceso de muestreo cuando detectamos un cierre de ciclo, para intentar mejorar la precisión del mapa resultante. También sería necesario probar el funcionamiento del algoritmo en un entorno mayor, incluyendo escenas capturadas en exterior.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno español a través del proyecto DPI2010-15308: *Exploración Integrada de Entornos Mediante Robots Cooperativos para la Creación de Mapas 3D Visuales y Topológicos que Puedan ser Usados en Navegación con 6 Grados de Libertad*.

Referencias

- [1] Amorós, F., Payá, L., Reinoso, Ó., Fernández, L., Marín, J.M., (2010) “Visual map building and localization with an appearance-based approach - comparisons of techniques to extract information of panoramic images”. *ICINCO 2010, Proceedings of the 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. pp. 423–426
- [2] Amorós, F., Payá, L., Reinoso, Ó., Jiménez, L.M., (2012) “Comparison of global-appearance techniques applied to visual map building and localization”. *VISAPP 2012 - Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. pp. 395–398
- [3] Dalal, N., Triggs, B., (2005) “Histograms of oriented gradients for human detection”. *CVPR 2005. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1, pp. 886–893
- [4] Fox, D., Burgard, W., Thrun, S., (1999) “Markov localization for mobile robots in dynamic environments”. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*. 11, pp. 391–427
- [5] Gil, A., Reinoso, O., Ballesta, M., Juliá, M., (2008) “Multi-robot visual SLAM using a rao-blackwellized particle filter”. *Robotics and Autonomous Systems*. 58(1), pp. 68–80
- [6] Lui, W.L.D., Jarvis, R., (2012) “A pure vision-based topological SLAM system”. *International Journal on Robotics Research*. 31(4), pp. 403–428
- [7] Lui, W., Jarvis, R., (2010) “A pure vision-based approach to topological SLAM”. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 3784–3791
- [8] Menegatti, E., Maeda, T., Ishiguro, H., (2004) “Image-based memory for robot navigation using properties of omnidirectional images”. *Robotics and Autonomous Systems*. 47, pp. 251–267

- [9] Paya, L., Fernandez, L., Reinoso, O., Gil, A., Ubeda, D., (2009) “Appearance-based dense maps creation. comparison of compression techniques with panoramic images”. *Proc. of the Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*. pp. 238–246
- [10] Paya, L., Fernandez, L., Gil, A., Reinoso, O., (2010) “Map building and Monte Carlo localization using global appearance of omnidirectional images”. *Sensors* 10(12), pp. 11468–11497
- [11] Romero, A., Cazorla, M., (2010) “Topological SLAM using omnidirectional images: Merging feature detectors and graph-matching”. *ACIVS 2010. Int Conf. on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. 6474, pp. 464–475
- [12] Seber, G., (1984) *Multivariate observations*. Wiley Interscience
- [13] Thrun, S., Fox, D., Burgard, W., Dellaert, F., (2000) “Robust Monte Carlo localization for mobile robots”. *Artificial Intelligence* 128(1-2), pp. 99–141
- [14] Tully, S., Kantor, G., Choset, H., (2012) “A unified Bayesian framework for global localization and SLAM in hybrid metric/topological maps”. *International Journal on Robotics Research* 31(3), pp. 271–288
- [15] Valgren, C., Lilienthal, A., (2007) “SIFT, SURF and seasons: Long-term outdoor localization using local features”. *Proc. of the 3rd European Conference on Mobile Robots (ECMR)*
- [16] Valiente, D., Fernandez, L., Gil, A., Payá, L., Reinoso, O. (2012) “Visual odometry through appearance- and feature-based method with omnidirectional images”. *Journal of Robotics*. 2012
- [17] Zhiwei, L., Xiang, G., Yanyan, C., Songhao, Z., (2013) “A novel loop closure detection method in monocular SLAM”. *Intelligent Service Robotics*. 6(2), pp. 79–87