

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 Politécnic de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
Miguel Ángel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia
Beltrán de La Cita, Jorge
Bermudez-Cameo, Jesus
Blanco-Claraco, Jose-Luis
Blanes, Francisco
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar
Gimenez, Antonio
Gruber, Patrick
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul
Marín Plaza, Pablo
Mañanas, Miguel Angel
Morales, Rafael
Moreno, Francisco-Angel

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control	
<hr/>	
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 FOTOBIOREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobioreactor raceway	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarréño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> 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 Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/> 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>	

Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT

David Garzón-Ramos, Mario Garzón y Antonio Barrientos

Centro De Automática y Robótica UPM-CSIC

Calle José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid, España

dgarzon@etsii.upm.es, ma.garzon@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Este artículo presenta un nuevo enfoque para la interceptación de objetivos móviles en escenarios complejos y de gran tamaño. El planificador para interceptación se basa en el algoritmo Risk-RRT. Para mejorar el desempeño del algoritmo original se ha realizado la adaptación e integración de técnicas basadas en el Método de Fast Marching. Las modificaciones realizadas han permitido integrar de forma efectiva la información del entorno dentro del planificador y mejorar sus capacidades. La integración completa es capaz de planificar online y seguir la trayectoria, al mismo tiempo que ejecuta las funciones de interceptación y evasión de obstáculos.

Palabras clave: Fast Marching Method, Planificación para Interceptación, Risk-RRT.

1 Introducción

Mejorar las capacidades de sistemas para vigilancia autónoma de infraestructuras es una tarea sobre la que se ha puesto gran atención en los últimos años. En este ámbito, el desarrollo de metodologías para el seguimiento e interceptación de objetivos móviles empleando vehículos terrestres no tripulados (UGV) es una tarea que se muestra prometedora en aplicaciones de seguridad y defensa. Existen diversos retos asociados al diseño e implementación de estas funcionalidades en sistemas robotizados, sin embargo, es posible destacar cuatro líneas principales de interés: detección y localización del objetivo, identificación y predicción de su trayectoria, planificación de una ruta para interceptarlo y finalmente, la ejecución de la trayectoria. El trabajo presentado en este artículo se enfoca en mejorar las etapas de predicción y planificación y se espera que pueda ser empleado en tareas de vigilancia de infraestructuras críticas de gran escala.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una mejora de algoritmo planificación para interceptación desarrollado por *Garzón et. al.* [1] mediante la integración de mapas de distancia

creados utilizando el Método de Fast Marching (FMM) [10], en un planificador basado en Rapidly-exploring Random Trees (RRT) [5]. El sistema original propuso un algoritmo para la interceptación de objetivos utilizando UGV's, con capacidad de evasión de obstáculos estáticos y dinámicos. Entre las ventajas de este algoritmo se pueden nombrar su completo acople a la arquitectura de navegación de robots móviles terrestres y que permite la incorporación de nuevas fuentes de información gracias a su diseño modular. El desarrollo presentado en este trabajo mantiene dichas características a la vez que mejora su rendimiento y adaptabilidad al agregarle una nueva capa de información.

Otros trabajos anteriores han buscado optimizar las capacidades de algoritmos basados en RRT mediante el Método de Fast Marching (FMM). Estos trabajos enfocan su desarrollo en los llamados Fast Marching Trees [2, 3]. Este tipo de algoritmo difiere de la implementación convencional de RRT debido a que emplea las capacidades del FMM para calcular, de forma recursiva, la distancia de recorrido entre nodos, en lugar de la distancia euclidiana normalmente utilizada. Así, busca generar trayectorias más cercanas al desplazamiento real del robot. El gran problema de esta implementación es que ejecuta de forma exhaustiva el FMM sobre cada nodo y esto tiene un coste computacional muy elevado.

Este artículo es el resultado de primeros estudios para optimizar el funcionamiento del algoritmo Risk-RRT en tareas de interceptación de intrusos, orientado a su aplicación en la protección de infraestructuras críticas. LA principal novedad del trabajo aquí presentado es la integración del FMM, que en este caso se hace mediante la inclusión global la información del mapa sobre todo el árbol, en lugar de realizarlo de forma local en cada nodo. La ejecución del FMM se realiza desde la posición del objetivo a interceptar para obtener la distancia desde ese punto a cualquier lugar en el escenario. De esta forma, dicha información puede ser aprovechada para estimar de forma correcta la distancia de cualquier nodo del árbol hasta la posición del objetivo y adicionalmente para pre-

decir las posibles rutas que este va a emplear para desplazarse.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se hace una descripción del algoritmo de interceptación basado en Risk-RRT. En la sección 3 se detalla la implementación del Método de Fast Marching. La sección 4 resume la obtención del mapa para la predicción de rutas. En la sección 5 se describe la integración de los algoritmos. La sección 6 muestra los experimentos y resultados y finalmente en la sección 7 se dan las conclusiones.

2 Interceptación de objetivos móviles mediante Risk-RRT

Risk-RRT es una estrategia de planificación propuesta en [4], la cual ha sido diseñada para operar en escenarios dinámicos y en presencia de incertidumbre. En esta, el riesgo de colisión es calculado usando modelos probabilísticos que representan objetos estáticos y dinámicos. El proceso usado para buscar las trayectorias óptimas se basa en una extensión del algoritmo Rapidly-exploring Random Tree (RRT) [5].

En el algoritmo Risk-RRT, el riesgo de colisión puede ser definido como la probabilidad de que el robot choque con algún obstáculo si desde el estado actual es aplicada una acción de control determinada. Con un entorno previamente conocido y representado por celdas de ocupación, la probabilidad de colisión con obstáculos estáticos está definida por la cercanía de los estados alcanzables por el robot a una celda marcada como ocupada. Por este motivo, la probabilidad de colisión en dichas celdas no cambia en el tiempo. En cambio, en presencia de obstáculos dinámicos, la probabilidad de colisión se extiende desde la posición instantánea del obstáculo en t_0 hasta la posible posición que ocupará en t_n .

En trabajos anteriores se han realizado modificaciones de este algoritmo que aprovechan la estimación del riesgo de colisión con un objeto móvil con el fin de determinar la ruta óptima para interceptarlo. Siendo esta una implementación del algoritmo RRT, la ruta es extraída de un árbol de configuraciones alcanzables por el robot. Los nodos del árbol, o puntos de paso del robot, son seleccionados de acuerdo peso ponderado entre la probabilidad de colisión con el objetivo móvil y la longitud estimada de la trayectoria. Una completa descripción de este trabajo puede ser encontrada en [1].

A pesar de los prometedores resultados de la técnica, existen inconvenientes asociados a la falta de integración del algoritmo con el entorno en

donde se desarrolla. El primer problema se presenta en la estimación de las distancias, en donde se emplea la distancia euclídea para calcular la distancia más corta entre un nodo y el objetivo móvil. El segundo problema está asociado al uso de modelos probabilísticos para la predicción del desplazamiento del objetivo móvil que no toma en cuenta su localización en el espacio. En ambos casos no se toma en cuenta la presencia de obstáculos en el entorno, lo que fácilmente se traduce en la aparición de soluciones con mínimos locales en la planificación y estimaciones de la probabilidad que no pueden ser extendidas a largos periodos de tiempo.

A las secciones posteriores se expone la implementación del Método Fast Marching y una primera aproximación para solucionar estas problemáticas mediante la combinación del algoritmo Risk-RRT con el Método Fast Marching.

3 Método Fast Marching

El Método de Fast Marching (FMM) es una técnica para seguir la evolución de un frente de onda que se expande en un medio viscoso. En este sentido, el frente de onda será una curva que separa el medio en una región interior y exterior, cuya evolución en el tiempo corresponde a un desplazamiento en la dirección normal al frente de onda. En el algoritmo original, el medio se considera isotrópico y la velocidad de expansión está determinada por la magnitud de la velocidad de desplazamiento en el medio, la cual no necesariamente es constante pero siempre debe ser positiva. Las variaciones del algoritmo original[6] modelan la velocidad de traslado con magnitud y dirección, considerando así modelos anisotrópicos del espacio, en donde el frente de onda evoluciona de distintas formas según sea su dirección de movimiento. Una velocidad de desplazamiento de cero, indica la imposibilidad del movimiento de la onda por dicho punto, tanto en el modelo isotrópico como en el anisotrópico.

En un punto dado, el movimiento del frente de onda esta descrito por la ecuación Eikonal:

$$\|\nabla T(x)\| F(x) = 1 \quad (1)$$

en donde T es el tiempo de llegada del frente en un punto x y $F \geq 0$ es la velocidad del frente en el punto x . Dado que el frente de onda únicamente se puede expandir, existe un valor único para T . En los siguientes apartados se describen los pasos previos a la construcción del mapa FMM, así como el algoritmo empleado para realizar la expansión de onda.

3.1 Mapa de Costos

El primer paso para realizar la implementación del algoritmo FMM es obtener una representación del espacio que se ajuste al modelo de interceptación de objetivos. Con este fin se construye un mapa de costos el cual corresponde a una representación modificada del escenario original y que además incluye información sobre la dificultad de desplazarse sobre un espacio determinado en el mapa.

Primero, se emplea una transformación de la distancia para añadir costos fijos sobre las trayectorias que pueden ser seguidas por los objetivos a interceptar o los robots. En el caso de los objetivos, esta técnica es empleada para modelar el comportamiento de evasión de obstáculos y con preferencia a permanecen distanciados de las paredes. De igual forma, los robots emplean esta información para establecer rutas seguras de desplazamiento, evitando riesgos de colisión. La transformación de la distancia se traduce en un gradiente en la escala de grises que rodea los obstáculos y paredes, con valor máximo alcanzado en las cercanías de los objetos y con un decrecimiento constante en la dirección normal del objeto, hasta alcanzar una extensión de seguridad mínima que se define de forma predeterminada. De este modo, en todos los procesos asociados al FMM se toma en cuenta la planificación de rutas con evasión de obstáculos tanto de los robots como de los objetivos.

Dado que la función del mapa de costos es brindar una representación del mapa que se ajusta a la tarea en desarrollo, en este caso también se contempla una etapa de escalado sobre el tamaño del mapa original. Este cambio en el mapa permite añadir o extraer píxeles de la imagen con el fin de optimizar ciertos procesos, sin que sea alterada en gran medida su composición general.

El proceso de escalado se realiza mediante un algoritmo de interpolación bilineal, que asegura que la posición en el mapa resultante tenga una correcta traducción que el mapa original. Cuando la imagen es escalada, a cada píxel original se le asigna uno o varios píxeles en la gráfica nueva, según el factor de escala deseado. Este método permite determinar el valor de intensidad del nuevo píxel, a través de una media ponderada de las intensidades de los píxeles conocidos en una vecindad de grados. En el Algoritmo 1 se resume el proceso de construcción del mapa de costos.

A partir del vector $Vm\{0, 1, \dots, k\}$, que representa las celdas de ocupación del mapa, se obtiene un nuevo vector $Cm\{0, 1, \dots, r\}$ en donde r está definido por el factor de escala C que relaciona la distancia en metros representada por cada píxel

Algorithm 1 Construcción del mapa de costos

Require: Vector $Vm\{0, 1, \dots, k\}$

Require: Factor de escala (C) & distancia de seguridad (d_s).

Ensure: Vector $Cm\{0, 1, \dots, r\}$; $r = S_x k$

- 1: **for** $i \leq k$ **do**
 - 2: $r =$ función de escalado(k, S).
 - 3: $Cm(r) =$ transformación de distancia ($Vm(k), d_s$).
 - 4: $r = r + 1$.
 - 5: **end for**
-

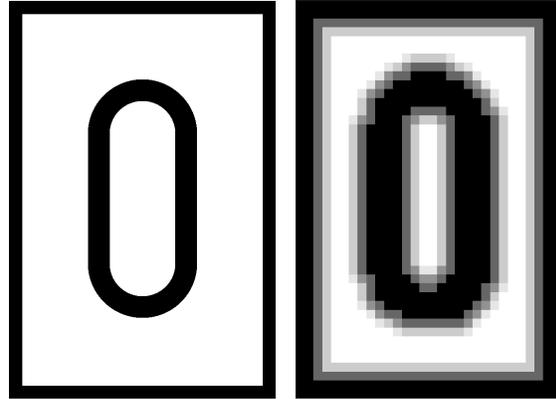


Figura 1: Variaciones de escala y distancia de seguridad en la construcción del mapa de costos.

en Vm y la distancia en metros deseada para Cm . De igual forma, se emplea la distancia de seguridad d_s para asignar un nivel de intensidad entre 0 y 100 a los píxeles que se encuentran en cercanías a obstáculos dentro del mapa.

En la Figura 1 se muestra la representación en forma de mapa de costos de un escenario arbitrario cuando es sometido al proceso de escalamiento y de transformación de la distancia. La variación de escala se ha realizado con $0.1m$ y $2m$ por píxel, y la distancia de seguridad con valores de 0 y $5m$. Se puede observar que aunque la resolución se ha reducido en más de un orden de magnitud, la imagen conserva su morfología y características más representativas. El efecto más notable de la reducción de la resolución, se evidencia en la incapacidad de generar una transformación de la distancia adecuada. Al reducir el número de píxeles por metro, disminuyen también la cantidad de intensidades de gris que pueden ser incluidas en el área de seguridad. Este efecto es poco deseado en los sistemas de navegación ya que supone un cambio brusco en la velocidad de movimiento.

3.2 Mapa de velocidades

A continuación el mapa de costes es ajustado al modelo de entrada del FMM. La información re-

querida para ejecutar el algoritmo es un mapa de velocidades, por este motivo el mapa de costos obtenido anteriormente es transformado al espacio de la velocidad en donde a cada pixel dentro del vector $Cm\{0, 1, \dots, r\}$ se le asigna un nuevo valor mediante la expresión:

$$W(r) = \frac{Cm(r)}{\max(Cm)} \quad (2)$$

En donde $W(r)$ simboliza la velocidad en el pixel r dentro del mapa de velocidades W . $Cm(r)$ representa el costo del desplazamiento en dicho pixel y $\max(Cm)$ corresponde al máximo valor en el mapa de costos. De este modo, la velocidad que puede ser alcanzada por la onda propagándose en un punto del mapa es inversamente proporcional al costo que supone desplazarse por ese punto. Suponiendo una velocidad máxima constante, las zonas totalmente libres de obstáculos obtendrán una velocidad máxima igual a 1 y aquellas que se encuentran ocupadas reciben una velocidad de 0 dado que es imposible desplazarse a través de ellas. En este caso, se ve reflejado el comportamiento de peatones en donde estos se mueven continuamente con velocidad constante en las áreas libres y sólo disminuyen su avance cuando se encuentran cerca de paredes u obstáculos.

3.3 Implementación de FMM

Dado que el algoritmo Risk-RRT se encuentra desarrollado para Robot Operating System (ROS). En este trabajo se ha realizado una adaptación para ROS de las librerías correspondientes a la Fast Marching Toolbox de Matlab®, desarrolladas por Gabriel Peyre¹. En esta implementación el algoritmo de FMM se ejecuta sobre un arreglo de celdas, correspondientes a los pixeles en una imagen, y asigna a cada pixel el tiempo de llegada del frente de onda según lo expuesto en la sección 3. De forma que, para un medio con igual velocidad de propagación en el espacio, la expansión de la curva resulta en círculos concéntricos que se alejan desde el origen hasta la distancia máxima que la onda puede recorrer dentro del mapa. En el Algoritmo 2 se describen los pasos empleados en la librería para realizar la expansión de onda mediante FMM.

En el Algoritmo 2 la función distanciaEikonal esta descrita por la expresión

Algorithm 2 Construcción del mapa FMM

Require: Vector $W\{0, 1, \dots, r\}$

Require: Posición inicial x_0 .

Ensure: Vector de distancias $D\{0, 1, \dots, r\}$.

- 1: Distancias $D\{0, 1, \dots, r\} = \infty$.
 - 2: Estados $S\{0, 1, \dots, r\} =$ no visitados.
 - 3: $D(x_0) = 0$ & $S(x_0) =$ visitado.
 - 4: **repeat**
 - 5: Busca $\min(D)$ con $S(\min(D)) =$ no visitado.
 - 6: Selecciona pixeles $[n_{right}, n_{left}, n_{up}, n_{down}]$ adyacentes a $\min(D)$.
 - 7: $S(\min(D))$ visitado.
 - 8: **for all** $S(n_j) =$ no visitado **do**
 - 9: $D(n_j) =$ distanciaEikonal desde $\min(D)$ a n_j .
 - 10: **end for**
 - 11: **until** $S(0, 1, \dots, r) =$ visitados
-

$$d = \begin{cases} \frac{d_x + d_y + \sqrt{\Delta}}{2} & \text{cuando } \Delta \geq 0, \\ \min(d_x, d_y) + W(\min(D)) & \Delta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

En donde

$$d_x = \min(D(n_{right}, n_{left})) \quad (4)$$

$$d_y = \min(D(n_{up}, n_{down})) \quad (5)$$

y con

$$\Delta = (2 * W(\min(D))) - (d_x - d_y)^2 \quad (6)$$

Los valores contenidos en el vector de distancias $D\{0, 1, \dots, r\}$ están definidos por la velocidad de expansión en el vector $W\{0, 1, \dots, r\}$. Si dichos valores son normalizados en $D_{norm}\{0, 1, \dots, r\}$, obtiene un valor proporcional a la normalización del tiempo de llegada de la onda a cualquier posición en el mapa.

En este sentido se generan tres tipos de valores según el tiempo requerido para alcanzar cualquier posición.

En el lugar en que se inicia la propagación del algoritmo FMM se tiene que $t = 0$. Dado que es la posición inicial, es alcanzada en el tiempo 0.

Luego se encuentran los valores comprendidos entre $0 < t < 1$, que son los tiempos necesarios para alcanzar cualquier posición en el mapa, en donde el valor más cercano a 1 corresponde a la posición más lejana respecto al punto de inicio del algoritmo.

Finalmente está el caso en que $t = 1$, este valor se reserva para las posiciones que se encuentran

¹ <http://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6110-toolbox-fast-marching>

ocupadas o no pueden ser alcanzadas. En estos puntos la velocidad W es cero y por tanto, los tiempos de llegada tienden al infinito. Por esta razón son acotados y se les asigna el valor de 1.

Este proceso se realiza asegurando que se mantienen los protocolos de datos empleados en los mapas de ROS, en donde para $D_{norm}(r) = 1$ el valor asignado para en el mapa de tiempos es $T(r) = 100$ y para $D_{norm}(r) < 1$ se calcula mediante la expresión

$$T(r) = 99 * \left(\frac{D(r)}{\max(D/D! = 1)} \right) \quad (7)$$

En su forma básica, el FMM recorre los píxeles de igual forma que se realiza en el algoritmo de Dijkstra, sin embargo, gracias a que las distancias entre píxeles son calculadas mediante la solución de la ecuación Eikonal, se logran eliminar efectos asociados a la fuerte discretización de los otros métodos. Las diferencias entre la forma de expansión y los efectos de discretización pueden ser estudiados en [7].

En la Figura 2 se muestra el mapa $T\{0, 1, \dots, r\}$, obtenido mediante el algoritmo FMM, en diferentes escenarios y con diferentes posiciones de origen. En la imagen, los píxeles azules indican posiciones temporalmente cercanas al punto de inicio, los píxeles rojos señalan aquellos que se encuentran más lejos, y por último, los píxeles amarillos muestran las posiciones inalcanzables. Es posible observar como en la figura inferior el escenario real tiene una variación menos uniforme de los tiempos en comparación a los mapas sintéticos de la figura superior, esto es causado por las zonas de baja densidad de píxeles en los extremos del mapa, en donde el costo de desplazamiento se incrementa y por tanto se disminuye en forma considerable la velocidad de movimiento en ese punto. En consecuencia, los tiempos para alcanzar dichos puntos, crecen notoriamente y alteran la normalización de $T\{0, 1, \dots, r\}$, causando que el resto del escenario se mantenga con un valor de tiempo más cercano al cero.

4 Mapa de predicción de trayectorias

El segundo inconveniente del algoritmo Risk-RRT a tratar en este trabajo es la obtención de una representación probabilística para la predicción de trayectorias que tome en cuenta la disposición de los obstáculos en el mapa. En el trabajo original [1] se emplea un modelo de predicción basado en el procesamiento de la trayectorias mediante el filtro de Kalman [8]. Dado que en este cálculo solo se incluye la información de la trayectoria seguida por

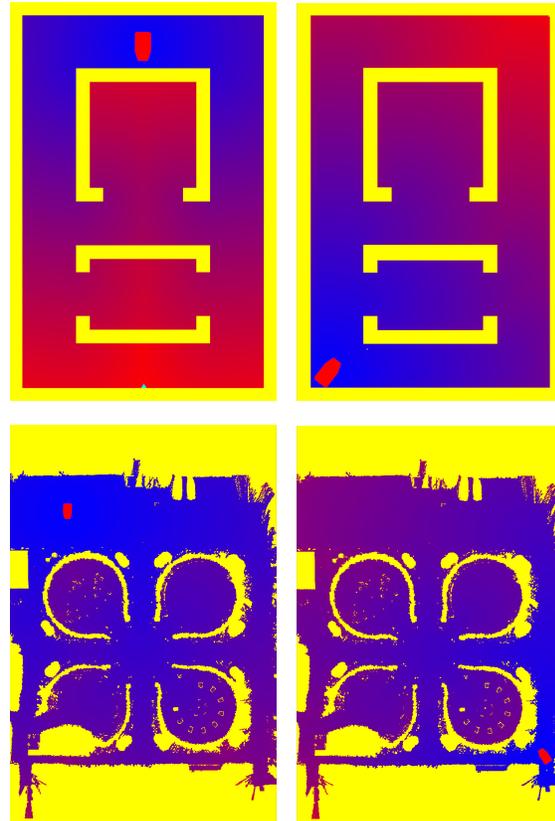


Figura 2: Mapas de tiempo obtenidos mediante FMM.

el objetivo, la predicción no puede lidiar con cambios considerables de dirección. Por este motivo se hace inviable para realizar predicciones a largo plazo y/o en escenarios de complejidad elevada.

Con el fin de optimizar la predicción a largo plazo, se ha integrado un mapa de probabilidades que representa la probabilidad de desplazamiento del objetivo desde su posición instantánea hacia cualquier posición en el mapa. El mapa de probabilidades ha sido obtenido mediante una técnica de predicción de desplazamiento de peatones que a través de la generación de grafos es capaz de estimar la probabilidad para todas las rutas posibles que recorren el mapa desde la posición del objetivo. Este algoritmo es una extensión del algoritmo FMM y aprovecha las operaciones detalladas en la sección 3 para realizar las predicciones. Para profundizar en la descripción de este algoritmo es posible referirse a [9].

De este modo el componente probabilístico de la selección de nodos en el algoritmo Risk-RRT no solo está basado en la trayectoria actual del objetivo si no que toma en consideración la estructura morfológica del escenario.

5 Integración en Risk-RRT

Como se ha mencionado anteriormente, el algoritmo RRT asigna un peso para cada nodo del árbol (i.e. cada configuración del espacio de búsqueda). Cuando el árbol se completa o el tiempo para la planificación se termina, el nodo con el mayor peso se selecciona como la próxima meta y la trayectoria para alcanzarlo se extrae del árbol.

La integración de los algoritmos presentado se basa justamente en la asignación de pesos a las configuraciones del árbol, teniendo en cuenta la información obtenida a partir del algoritmo FMM y el mapa de probabilidades expuestos en secciones anteriores.

La primera modificación radica en que la distancia entre los nodos y el objetivo no se calcula mediante la distancia euclídea entre ambos. En su lugar, los nodos obtienen la distancia del mapa de distancias que resulta de emplear el algoritmo FMM descrito en la sección 3. Así las ventajas de baja discretización y la no existencia de mínimos locales son extendidas en la construcción del árbol.

El segundo punto de optimización del algoritmo busca extender sus capacidades de predicción. Con este fin se ha añadido el mapa de probabilidades de la sección 4 en el cálculo de los pesos del nodo. Añadir una componente de predicción a largo plazo en la selección de la ruta mejora las capacidades de respuesta del árbol en escenarios de alta complejidad y distancias elevadas. La mayor ventaja en este caso radica en que la predicción se realiza sobre todas las rutas posibles para alcanzarlo.

6 Experimentos y Resultados

Para demostrar la capacidad de integración de los algoritmos se ha fijado un escenario en el que un robot debe interceptar un objetivo señalado en el mapa. En la Figura 3 se muestra la planificación de trayectorias del algoritmo RRT con diferentes configuraciones de funcionamiento y la posiciones del robot y del objetivo señaladas con iconos de color azul y rojo respectivamente. El mayor reto de este experimento está representado por la configuración del escenario y la posición inicial del robot. Este se ha ubicado en un mínimo local y a su vez, la posición del objetivo se ha dejado estática para apreciar con más claridad los efectos de las diferentes etapas de integración de los algoritmos.

En la primera fila se muestran tres instantes de tiempo de la planificación realizada por el algoritmo original. Se puede observar que por sí solo

el algoritmo no es capaz de resolver fácilmente el problema de salir del mínimo local, dado que su nodo más probable está determinado por la distancia euclídea y no toma en cuenta la presencia de obstáculos. Para resolver este problema es posible modificar la parametrización del algoritmo Risk-RRT para generar un árbol con mayor distancia entre nodos o una apertura mayor del mismo. Sin embargo, cuando se aumenta la distancia mínima entre nodos se pierde resolución en la navegación del robot y se genera dificultades al maniobrar en pasillos pequeños. Por otro lado, cuando el problema se intenta resolver aumentando indiscriminadamente la extensión del árbol se genera un costo computacional muy elevado.

En la segunda fila se muestra la integración del algoritmo de RRT con el mapa $T\{0, 1, \dots, r\}$ obtenido de FMM. Manteniendo la configuración inicial del árbol en el algoritmo original se puede apreciar como el cambio de la distancia euclídea a por una distancia de recorrido mejora sustancialmente el desempeño del algoritmo, llevándolo a una solución satisfactoria para alcanzar el objetivo. En este punto se encuentra también un crecimiento más rápido del árbol ocasionado por la supresión de los cálculos de distancia euclídea en la generación de cada nodo. Como se mencionó anteriormente, la existencia de un solo mínimo global en la expansión del mapa obtenido mediante FMM permite al robot salir fácilmente del mínimo local alcanzado con el algoritmo original y encontrar una trayectoria adecuada.

Finalmente, en la última fila se muestra el comportamiento obtenido en la expansión del árbol cuando se añade el peso del mapa de probabilidades. En las figuras, una probabilidad más alta se muestra como zonas de mayor claridad, en contraste con zonas de menor probabilidad con colores más oscuros. Se ha dado un pequeño incremento a la probabilidad de que el objetivo se desplace por la ruta de la izquierda, esto con el fin de clarificar el comportamiento del árbol en presencia de bifurcaciones. En las figuras se muestra como la expansión del árbol se realiza en su mayoría en la zona mayor probabilidad al alcance del robot. Esto permite al algoritmo concentrar los recursos computacionales en el descubrimiento de rutas en las zonas en que es más probable interceptar el objetivo en relación a las posibles rutas por las que este se puede desplazar.

Este es un primer paso en la implementación de técnicas basadas en FMM para la optimización de las tareas de interceptación de objetivos en la protección de infraestructuras críticas. El alcance de este trabajo está limitado a demostrar la factibilidad de la optimización de la tarea de in-

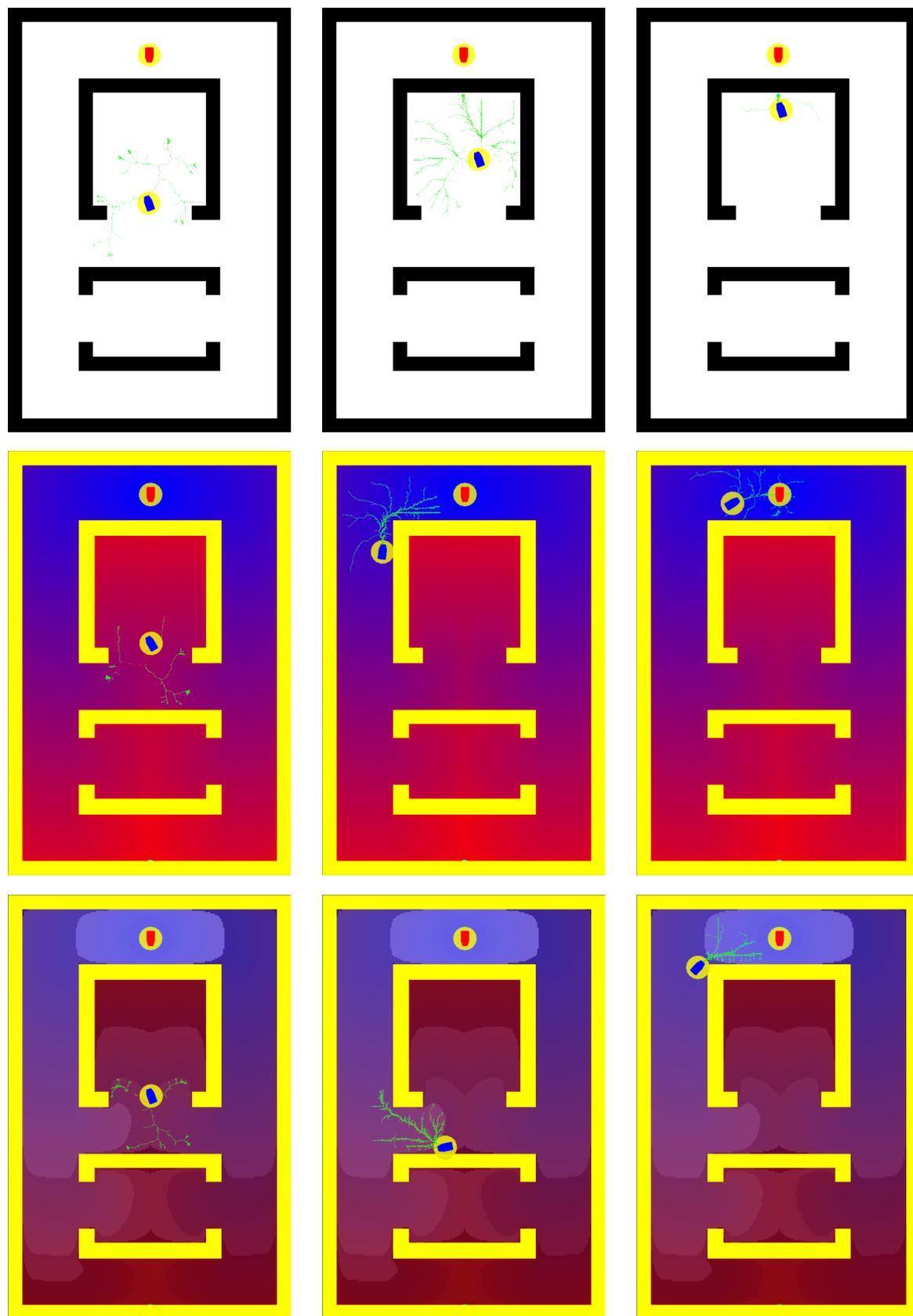


Figura 3: Trayectorias obtenidas con RRT, RRT+FMM y RRT+FMM+Predicción

terceptación realizada por el algoritmo Risk-RRT. Trabajos posteriores se dedicarán a la obtención de resultados cuantitativos sobre la integración propuesta.

7 Conclusiones

Se comprobó la compatibilidad y buena integración del algoritmo Risk-RRT, el Método de Fast Marching y la predicción de trayectorias basada también en FMM. Los algoritmos comparten la misma información de entrada y no requieren consideraciones adicionales para su funcionamiento conjunto.

Se ha demostrado como la inclusión intrínseca de la información aportada por el escenario mejora en gran medida el comportamiento del algoritmo Risk-RRT. Se encontró que la información aportada por el mapa en el algoritmo original es escasa y solo permite realizar las tareas de evasión de obstáculos. Al reemplazar dicho mapa con el mapa obtenido de FMM se logró incluir información relevante para resolver situaciones con mínimos locales sin tener que modificar la etapa de planificación. También, la inclusión adicional del mapa de probabilidades ha permitido mejorar el desempeño del algoritmo en situaciones de predicción de largo alcance.

Finalmente se han logrado demostrar la potencialidad del algoritmo Risk-RRT para desempeñar tareas de interceptación de objetivos. Las modificaciones realizadas permitirán desarrollar trabajos futuros que incluyan la integración de mapas con nuevos modelos probabilísticos e información de interés en la selección de la ruta óptima.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid (España), siendo financiado por los proyectos: PRIC (Protección robotizada de Infraestructuras Críticas; DPI2014-56985-R), patrocinado por el Ministerio español de Economía y Competitividad y RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la Mejora de la Calidad de Vida de los Ciudadanos fase III; S2013 / MIT-2748), financiado por Programas de Actividades de I + D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por Fondos Estructurales de la UE.

Referencias

[1] Garzón, M., Fotiadis, E.P., Barrientos, A., Spalanzani, A. (2014). RiskRRT-Based Planning For Interception of Moving Objects in Complex Environments. In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Advances

in Intelligent Systems and Computing, vol 253. Springer, Cham.

- [2] Janson, L., Schmerling, E., Clark, A., & Pavone, M. (2015). Fast marching tree: A fast marching sampling-based method for optimal motion planning in many dimensions. *The International journal of robotics research*, 34(7), 883-921.
- [3] Starek, J., Schmerling, E., Janson, L., & Pavone, M. (2014). Bidirectional fast marching trees: An optimal sampling-based algorithm for bidirectional motion planning. In *Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics*.
- [4] Fulgenzi, C., Spalanzani, A., Laugier, C., & Tay, C. (2010). Risk based motion planning and navigation in uncertain dynamic environment.
- [5] LaValle, S. M., & Kuffner Jr, J. J. (2001). Randomized kinodynamic planning. *The International Journal of Robotics Research*, 20(5), 378-400.
- [6] Petres, C., Pailhas, Y., Petillot, Y., & Lane, D. (2005, June). Underwater path planning using fast marching algorithms. In *Oceans 2005-Europe (Vol. 2, pp. 814-819)*. IEEE.
- [7] Peyré, G. (2011). The numerical tours of signal processing. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 94-97.
- [8] Garzón, M., Garzón-Ramos, D., Barrientos, A. & Cerro, J. (2016). Pedestrian Trajectory Prediction in Large Infrastructures - A Long-term Approach based on Path Planning. In *Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 381-389.
- [9] Garzón Ramos, D. A., Garzón Oviedo, M., & Barrientos Cruz, A. (2016). Pedestrian Motion Prediction: A Graph Based Approach.
- [10] Sethian, James A. (1996). A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(4), 1591-1595.