XXXIV JORNADAS DE AUTOMÁTICA

Terrassa, 4-6 de septiembre 2013

Actas

Actas de las

XXXIV Jornadas de Automática

Terrassa, 4 al 6 de Septiembre de 2013

Organizan:

Actas de las XXXIV Jornadas de Automática

Editado por:

Ramon Sarrate Estruch

Joseba Quevedo Casín

ISBN: 978-84-616-5063-7

Depósito Legal: B. 17365-2013

Presentación

Las XXXIV Jornadas de Automática (JA2013), a realizar del 4 al 6 de Septiembre del 2013 en el Campus de Terrassa de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), han sido organizadas por el Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAII) de la UPC.

Las Jornadas vienen realizándose anualmente desde el año 1977, promovidas por el Comité Español de Automática (CEA), y organizadas por distintas universidades o centros de investigación.

Al evento se han inscrito aproximadamente 200 expertos en esta área, principalmente miembros del Comité Español de Automática (CEA), que está organizado en 9 grupos temáticos: Automática Marina, Bioingeniería, Control Inteligente, Educación en Automática, Ingeniería de Control, Modelado y Simulación, Robótica, Sistemas de Tiempo Real y Visión por Computador.

La conferencia inaugural será impartida por Mª Luisa Castaño Directora General de Innovación y Competitividad del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO). El programa técnico incluye dos conferencias plenarias (una a cargo de Manfred Morari sobre "The role of Theory in Control Practice" y la otra a cargo de Ramon Vilanova sobre "El PID en el Tercer Milenio"), una reseña sobre la historia de la Automática por parte de Sebastián Dormido, una presentación de las oportunidades que ofrece Universia por parte de Jaume Pagés, una mesa redonda docente sobre los Másteres en Automática, las reuniones técnicas de los diferentes grupos temáticos y sesiones de presentación de comunicaciones expuestas, como es costumbre en las Jornadas, en un espacio con pósteres. Y este año como novedad se llevará a cabo un interesante curso sobre robótica asistencial y cuatro presentaciones prácticas de empresas muy interesantes. Además se ha previsto en el día central de las Jornadas realizar un entrañable reconocimiento a los impulsores de la Automática en la UPC.

El programa técnico viene acompañado, como es habitual, con un interesante programa social y cultural, como la visita del Museo Nacional de la Ciencia y la Tecnología de Catalunya (MNATEC) y la copa de bienvenida en la sala Jazz Cava de Terrassa así como la visita románica de Sant Benet del Bages, visita al Instituto gastronómico Alicia y cena de gala en el restaurante de ese entorno.

Además, y como viene siendo habitual en las Jornadas precedentes, el programa técnico y el programa social vienen acompañados de un programa de ocio y de actividades para acompañantes.

Y sin olvidar que como en ediciones pasadas, este año también se llevarán a cabo los concursos de robots humanoides y de vehículos cuatrirrotores o "drones" con una fantástica respuesta de participación de equipos investigadores nacionales e internacionales.

Por último, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que han prestado su colaboración a que la presente edición de las Jornadas haya sido posible. A todos los miembros del comité organizador, pieza indispensable para el buen funcionamiento del evento, y a todos los miembros del comité científico. También queremos agradecer a las empresas colaboradoras por los diferentes premios ofrecidos durante las XXXIV Jornadas de Automática.

Os damos la bienvenida a todos los participantes y quedamos a vuestra disposición para garantizar una estancia grata y fructífera durante estos días.

Más información en la Web de las Jornadas en http://ja2013.upc.edu/

Terrassa, 20 de Julio de 2013

Joseba Quevedo, Teresa Escobet y Vicenç Puig

Co-responsables del Comité Organizador

Comités Organizador y Científico

Comité organizador

Joseba Quevedo	Josep Mª Fuertes
Vicenç Puig	Pere Caminal
Teresa Escobet	Enric Fossas
Fatiha Nejjari	Maria Serra
Andreu Quesada	Robert Griñó
Sebastián Tornil	Beatriz F. Giraldo
Josep Contreras	Jose María Huerta
Rosa Ginesta	Cecilio Angulo
Albert Márquez	Pere Ponsa
Albert Masip	Ramon Costa
Judit Esteve	Diego García
Ramon Sarrate	Ramon Pérez
Quim Blesa	Damiano Rotondo
Rita Planas	Juan C. Hernández
Pep Cugueró	Carlos Ocampo
Miquel Àngel Cugueró	Josep Pascual
Ramon Comasòlivas	

Comité científico

Presidente CEA: César de Prada (UVA)

Vicepresidente CEA: Joseba Quevedo Casín (UPC)

Secretario CEA: Miguel Ángel Mañanas Villanueva (UPC)

Automar: Pere Ridao Rodríguez (UdG)

Bioingeniería: Javier Pérez Turiel (UVA)

Control Inteligente: José Manuel Andujar Márquez (UHU)

Educación en Automática: Fabio Gómez Estern (US)

Ingeniería de Control: Francesc Xavier Blasco Ferragud (UPV)

Modelado y Simulación de sistemas dinámicos: Miguel Ángel Piera Eroles (UAB)

Robótica: Pedro J Sanz Valero (UJI)

Sistemas de Tiempo Real: Alejandro Alonso Muñoz (UPM)

Visión por Computador: Enrique Alegre Gutiérrez (UL)

Comunicaciones

Automar

GRASPER: Un Proyecto Dirigido a Incrementar la Autonomía de la Manipulación Submarina
P. J. Sanz, J. J. Fernández, J. Pérez, A. Peñalver, J. C. García, D. Fornas, J. Sales, J. Bernabé, R. Marín

DISEÑO MECATRÓNICO DE UN ROBOT SUBMARINO DE BAJO COSTE PARA USO DOCENTE
Manuel Godoy, Ramón González, Francisco Rodríguez

SENSORES CIENTÍFICOS PARA UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBMARINO
Narváez, F., González, H., García, E.

SISTEMA DE COMUNICACIONES PARA UN PLANEADOR AUTÓNOMO SUBMARINO
González, H., Narváez, F., García, E.

Automatización de vehículo marino no tripulado en superficie para guiado autónomo
Carlos Cano Espinosa, Santiago T. Puente Méndez, Fernando Torres Medina

Realtime AUV Terrain Based Navigation with Octomap
Guillem Vallicrosa, Albert Palomer, David Ribas, Pere Ridao

Bioingeniería

Asistencia de Robots Colaborativos para Procedimientos de Sutura vía Cirugía Mínimamente Invasiva
Enrique Bauzano Núñez, María Belén Estebanez Campos, Isabel García Morales, Víctor Fernando Muñoz Martínez

INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE MINI-ROBOTS A LA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA DE INCISIÓN ÚNICA
María Cuevas Rodríguez, Irene Rivas Blanco, Enrique Bauzano, Jesús Gómez deGabriel y Víctor Fernando Muñoz

CONTROL FUERZA-POSICIÓN DE UNA CÁMARA ROBÓTICA PARA TÉCNICAS DE CIRUGÍA DE PUERTO ÚNICO
I. Rivas-Blanco, E. Bauzano, M. Cuevas-Rodriguez, P. del Saz-Orozco, V.F. Muñoz

Desarrollo de un Sistema Multimodal de Rehabilitación asistida por Robots
R. Morales, F. Badesa, N. Garcia-Aracil, J.M. Sabater, Miguel Almonacid

Aspectos de diseño y evaluación preliminar de la plataforma robotizada de neuro-rehabilitación PHYSIOBOT
Juan-Carlos Fraile Marinero, Javier Pérez Turiel, Carlos Rodríguez Guerrero, Rubén Alonso Alonso, Dra. Paulina Oliva Navarrete

Sistema Robótico Planar para Neuro-rehabilitación: Primeros Resultados con pacientes
F. Badesa, R. Morales, A.Llinares, N. Garcia-Aracil, Maria Garcia-Manzanares, Daniel Tornero, M. Oliva

CLASIFICACIÓN DE SEÑALES DE POTENCIAL DE ERROR A TRAVÉS DE UNA INTERFAZ GRÁFICA CON REALIMENTACIÓN DE FUERZAS
Joaquín López, Andrés Úbeda, Eduardo Iáñez, D. Planelles, José M. Azorín, Javier Gimeno, José A. Flores, José M. Climent

MOVIMIENTO BIDIMENSIONAL DE UN CURSOR MEDIANTE EL USO DE ARTEFACTOS EN SEÑALES ELECTROENCEFALOGRÁFICAS
Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, Enrique Hortal, José M. Azorín, Alberto Rodríguez, Daniel Tornero, José A. Berná, José M. Cano

MRSeg - Herramienta interactiva para generar segmentaciones de referencia de imágenes médicas
F. Fumero, S. García, O. Núñez, J. Sigut, S. Alayón

ANÁLISIS ESPECTRAL NO LINEAL DEL EEG DE NIÑOS CON EPILEPSIA INTRATABLE
O. Portolés, R. Schroeder, M. Vallverdú, A. Voss, P. Caminal

Evaluación de métodos de segmentación de propósito general sobre imágenes de fondo de ojo
Omar Núñez, Francisco Fumero, Jose Sigut, Silvia Alayón.

Control Inteligente

REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN UN REGULADOR PID PARA CONTROL AUTOMÁTICO DEL RUMBO DE UN BUQUE
José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Matilde Santos

CONTROL HIBRIDO DIFUSO-DESLIZANTE PARA CONVERTIDOR DC/DC TIPO BOOST
Mónica L. Vásquez F., Edwar Jacinto G., Fredy H. Martínez S.

Social and Smart SANDS
Raúl Feliz Alonso, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo, Bruno Apolloni

DESARROLLO DE UN CONTROLADOR BORROSO PARA EL CONTROL DE LA PROFUNDIDAD ANESTÉSICA MEDIANTE ARDUINO
Israel Riveron, Juan A. Mendez, A. Marrero, Ana Leon, Isabel Martin

Modelado borroso de una Pila de Combustible NexaTM 1.2 kW Ballard Power System
Antonio Javier Barragán Piña, Francisca Segura Manzano, José Manuel Andújar Márquez, Miguel Ángel Martínez Bohórquez

CONTROL DE ANESTESIA MEDIANTE LÓGICA DIFUSA CON DINÁMICA INVERSA
A. Marrero Ramos, J.A. Méndez Pérez, J.A. Reboso Morales, A. M. León Fragoso, I. Martín Mateos, E. Morell González

CONTROL AUTÓNOMO DEL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR
Tur Ortega, José Manuel; Santos Peñas, Matilde

MODELADO DE UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO MEDIANTE APLICACIÓN CONJUNTA DE TECNICAS PARAMETRICAS Y NEURONALES
Jesús Enrique Sierra García, Matilde Santos

Comparación de técnicas de optimización multi-objetivo clásicas y estocásticas para el ajuste de controladores PI
Helem Sabina Sánchez, Gilberto Reynozo-Meza, Ramon Vilanova, Xavier Blasco

Educación en Automática

Utilización del software AnyLogic en la enseñanza del Control Automático
José María González de Durana y Oscar Barambones

SISTEMAS DE DOCUMENTACIÓN Y ELABORACIÓN DE TEXTOS CIENTÍFICOS: UNA ASIGNATURA PARA APRENDER A PUBLICAR EN INGENIERÍA
Jorge L. Martínez, Anthony Mandow y Alfonso García-Cerezo

simLab: Laboratorio de simulación de la planta Festo
Silvia Alayón, Norena Martín, Omar Núñez, Francisco Fumero

Simuladores 3D y evaluación automática para prácticas de Automatización Industrial
Adolfo J. Sánchez del Pozo, David Muñoz de la Peña, Fabio Gómez-Estern

HERRAMIENTAS DE HARDWARE Y SOFTWARE LIBRE PARA LA IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL, EL DISEÑO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID
Roberto Sanchis Llopis, Silvia Estupiña Ariño

Laboratorio Virtual y Remoto de robots paralelos
Arturo Gil, Adrián Peidró, José María Marín, Óscar Reinoso, David Valiente, Luis Miguel Jiménez, Miguel Juliá

Benchmark de Control y Supervisión de Redes de Distribución de Agua
Gerard Sanz, Ramon Pérez

Aprendizaje colaborativo e interinstitucional en entornos virtuales
Antonio Javier Barragán Piña , José Manuel Andújar Márquez , Yolanda Ceada Garrido, Eloy Irigoyen Gordo , Fernando Artaza Fano , Vicente Gómez Garay

HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN BIORREACTOR DISCONTINUO
Adrián Casimiro Álvarez, Javier de Pedro López, Antonio Coca Riega, Diego García-Ordás

PLATAFORMA ROBÓTICA DE BAJO COSTE Y RECURSOS LIMITADOS BASADA EN ARDUINO Y DISPOSITIVOS MÓVILES
A. Soriano, L. Marín, R. Juan, J. Cazalilla, A. Valera, M. Vallés, P. Albertos

Desarrollo de plantas industriales virtuales para el aprendizaje de la automatización
Rodríguez Díaz, Francisco; Moreno Úbeda, José Carlos; Pawlowski, Andrzej; Sánchez Molina, Jorge Antonio; López, Antonio

Herramienta basada en SCORM para la integración automática de Laboratorios Online en LMS
Ildefonso Ruano Ruano, Juan Gómez Ortega, Javier Gámez García, Elisabet Estévez Estévez

DESARROLLO DE UN EQUIPO DIDACTICO PARA LAS MATERIAS DE CONTROL DE PROCESOS DE LOS GRADOS DE INGENIERIA DE LA RAMA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS TIC
Teresa Escobet Canal, Antonio Escobet Canal, Juan Martínez Domence

APLICACIÓN DE CONTROL CON LABVIEW PARA EL SIEMENS S7-1200, EN RED LOCAL O INTERNET
Eduardo J. Moya de la Torre, Francisco J. García Ruíz, Israel Surribas Planas

SISTEMAS DE CONTROL POR COMPUTADOR - UNIFICACIÓN DE CRITERIOS
José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Ramón Ferreiro García

Ingeniería de Control

Control Multivariable QFT para la Dinámica Longitudinal de un Vehículo Aéreo
Javier Joglar Alcubilla
Joaquín Aranda Almansa

Control de Velocidad mediante Paso de Pala para un Aerogenerador Experimental de Pequeña Potencia
Sergio Fragoso Herrera, Francisco Vázquez Serrano, Fernando Morilla García

Control Multivariable Descentralizado para un Aerogenerador Experimental de Pequeña Potencia
Sergio Fragoso Herrera, Francisco Vázquez Serrano, Fernando Morilla García

Modelado y control de un vehículo eléctrico mediante una estrategia de control predictivo basado en modelo
Agustín Pérez Castro, Julio Elias Normey Rico, José Luis Guzmán Sánchez, Manuel Berenguel Soria

Estrategia para la corrección de modelos no lineales variantes en el tiempo mediante estimación de parámetros: Aplicación al control predictivo y a la diagnosis de sistemas
Agustín Pérez Castro, José Sánchez Moreno, José Luis Guzmán Sánchez

Sistema experto para la determinación de referencias en el proceso de elaboración de aceite de oliva virgen
P. Cano Marchal, D. Martínez Gila, J. Gámez García, J. Gómez Ortega

DISEÑO DE LOS CONTROLADORES DE LOS SISTEMAS DE VACÍO Y TEMPERATURA DE UN REACTOR AGITADO
Ferran Babot Branzuela, Ramon Costa Castelló

LA ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS APLICADA AL MANTENIMIENTO DE DISPOSITIVOS DE CAMPO
Ramón Ferreiro García, José Luis Calvo-Rolle, José Luis Casteleiro-Roca, Manuel Romero Gómez

Estimación Garantista de la Posición de un Quadrotor con GPS
Ramón A. García, Manuel G. Ortega, Francisco R. Rubio y Guilherme V. Raffo

DISEÑO DE CONTROLADORES POR ADELANTO PARA INVERSIÓN DE RETARDO NO REALIZABLE
C. Rodríguez, J.L. Guzmán, M. Berenguel, T. Hägglund, J.E. Normey-Rico

Restricciones en el Valor de los Enlaces de Comunicación en un Sistema de Control Coalicional
Francisco Javier Muros Ponce, Jose María Maestre Torreblanca, Encarnación Algaba Durán, Eduardo Fernández Camacho

ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS REFORZADA MEDIANTE SUPERVISIÓN DE ELEMENTOS FINALES DE CONTROL
Ramón Ferreiro García, José Luis Calvo-Rolle, José Luis Casteleiro-Roca, Manuel Romero Gómez, Alberto Demiguel Catoria

Control No Lineal Iterativo de Modelos de Maniobra de Vehículos Marinos
Elías Revestido, M. Tomás-Rodríguez (b), Francisco J. Velasco

A ROBUST GRID SIDE CONVERTER CONTROL FOR WIND TURBINE SYSTEM BASED ON DOUBLE FEED INDUCTION GENERATOR
Oscar Barambones, José María González de Durana and Patxi Alkorta

Plataforma para monitorización y control distribuidos basada en 802.15.4
Conrado Arquer, Luis Orihuela, Francisco R. Rubio

DETECCION DE FALLOS CON VALIDACION PROBABILISTICA
Joaquim Blesa, Amalia Luque, Teodoro Alamo, Fabrizio Dabbene

CONTROL DE ACTITUD DE UN COHETE DE SONDEO ATMOSFERICO
Pau Manent, Joseba Quevedo, Bernardo Morcego

Desarrollo de una herramienta para el análisis de datos multi-criterio. Aplicación en el ajuste de controladores del tipo PID.
Alberto Pajares Ferrando, Francesc Xavier Blasco Ferragud, Gilberto Reynoso-Meza, Juan Manuel Herrero Dura

CONTROL DE POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA OMNIDIRECCIONAL NO-HOLONOMA
Pablo Bengoa Ganado, Josu Larrañaga Leturia, Eloy Irigoyen

Validación experimental de estrategias de reducción del consumo de sensores inalámbricos en sistemas de control en red.
Ignacio Peñarrocha, Adrian Dinu, Roberto Sanchis

SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLOS BASADO EN TÉCNICAS DE ERROR ACOTADO Y UMBRAL DINÁMICO
José Manuel Bravo Caro

Diseño Óptimo Multiobjetivo de PIDs para el Control de Temperatura en Cavidades Microondas
S. Garcia-Nieto, G. Reynoso-Meza, F. Peñaranda-Foix, A. Borrell

Diseño e implementación en UAVs de un sistema de control de formación de vuelo basado en SMRC
Ignacio Ribelles, Alejandro Vignoni, Sergio García-Nieto, Jesús Picó

OBSERVATION OF THE INTERNAL STATES OF A PEMFC ANODE GAS CHANNEL
J. Luna, C. Batlle, C. Kunusch, J. Riera, M.L. Sarmiento-Carnevali, M. Serra

Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos

Modelo para la generación de datos de consumo energético residencial basado en un enfoque probabilístico
J.K. Gruber, M. Prodanovic

PROGRAMACIÓN DE CONTROLADOR PREDICTIVO EN ECOSIMPRO E IMPLEMENTACIÓN EN PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO
Juan David Tejerina, Rubén Martí, Daniel Navia, César de Prada

PREDICTOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN TÉCNICAS DE ERROR ACOTADO
José Manuel Bravo Caro

Modelo simplificado y orientado al control de sistemas de refrigeración
Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega, Francisco R. Rubio, Fernando Morilla

Estudio de la interacción del fuselaje y el movimiento de aleteo de las palas del rotor principal en un helicóptero
Salvador Castillo-Rivera, María Tomás-Rodríguez, G. Nicolás Marichal Plasencia, Ángela Hernández López

TENSIONES INDUCIDAS EN CABLES DE ALTA TENSIÓN
Miguel Angel Calafat Torres, Matilde Santos Peñas

SIMULACIÓN Y CONTROL DE COMPRESORES CENTRÍFUGOS USANDO ECOSIMPRO
Tania Rodríguez Blanco, Daniel Sarabia Ortiz, César de Prada Moraga, José Luis Morales

CONCURRENT AND DISTRIBUTED SYSTEMS ANALYSIS USING COLORED PETRI NETS
Jenaro Nosedal Sánchez, Olatunde Baruwa, Miquel Ángel Piera Eroles

DESARROLLO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MODELO DINÁMICO PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON MOTORES EN LAS RUEDAS
David Marcos, Carlos Bordons, Johan Wideberg, Daniel A. Mántaras, Pablo Luque.

MODELO NARMAX DE PH EN UN FOTOBIORREACTOR TUBULAR DE MICROALGAS
I. Fernández, G.A. Andrade, J.L. Guzmán, M. Berenguel, D.J. Pagano

Identificación de un modelo pasivo para la grúa Inteco 3D Crane e implementación en EJS
Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Miguel D. Cacho, Emma Delgado

Intercambio de Modelos entre Herramientas de Simulación con Functional Mock-up Interface (FMI)
Javier Bonilla, José Domingo Álvarez, Lidia Roca, Alberto de la Calle, Luis José Yebra, Francisco Rodríguez

Modelado del reactor químico del proceso BTO mediante redes neuronales artificiales
Gorka Sorrosal, Eloy Irigoyen, Cruz E. Borges, Ainhoa Alonso

ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE EXPLOSIÓN DE ESTADOS EN SISTEMS DICRETOS BASADO EN EL CUBO RUBIK
Emilio Jimenez Macias, Francisco Javier Leiva Lazaro, Juan Ignacio Latorre Biel, Mercedes Perez de la Parte

MODELADO DE UN PROCESO DE EXTRUSIÓN EN ALIMENTACIÓN
Eduardo J. Moya de la Torre, F. Javier Antolín Jiménez, Alfonso Poncela Méndez,Oscar F. Calvo Martínez

Reducción de modelos en Biología Sintética: Modelado y simulación de ruido y variabilidad en expresión genética.
Yadira Boada, Alejandro Vignoni, Jesús Picó

Robótica

Desarrollo de una clase en Matlab para la simulación realista de robots seriales
R. Morales, A. Sanchez, F. Badesa, N. Garcia-Aracil, C. Perez, J.M. Sabater

GEOMETRIC HYBRID PATH PLANNING FROM THE ARTIFICIAL POTENTIAL FIELD METHOD
Cristian C. Rincón, Edwar Jacinto G. y Fredy H. Martínez S.

DISEÑO Y DESARROLLO DE ROBOT MÓVIL PARA TRANSPORTE Y DISPENSACIÓN DE MEDICAMENTOS
Roberto Pinillos, Salvador Domínguez, Eduardo Zalama, Jaime Gómez García-Bermejo, Ángel de Miguel Navares

Manipulación de Objetos con dos Dedos Usando Información Táctil
Andrés Montaño, Raúl Suárez

Búsqueda de prensiones con force-closure de objetos 2D articulados con 2 eslabones
Noé Alvarado Tovar, Raúl Suárez

SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE SLAM EMPLEANDO SGD CON IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES
David Valiente, Arturo Gil, Miguel Juliá, Lorenzo Fernández, Óscar Reinoso

CONTROL VISUAL EMBEBIDO PARA EL POSICIONAMIENTO AUTÓNOMO DE UN HEXACÓPTERO
Javier Pérez, Jorge Pomares, Gabriel J. García, F. Torres

LOCALIZACIÓN ASISTIDA POR GPS PARA ROBOTS MÓVILES EN CONFIGURACIÓN ACKERMANN DE RECURSOS LIMITADOS
Leonardo Marín, Ángel Soriano, Vicent Mayans, Marina Vallés, Ángel Valera, Pedro Albertos

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES FUERZA Y POSICIÓN PARA UN MANIPULADOR PARALELO DE 3DOF
Jose I. Cazalilla, Miguel Corberán, M. Díaz-Rodríguez, Ángel Valera, Vicente Mata, Marina Vallés

Fusión sensorial de visión, fuerza y aceleración para el control de robots manipuladores con movimientos restringidos.
Alejandro Sánchez García, Javier Gámez García, Juan Gómez Ortega

Mejora de las Capacidades de un Robot Mini-Humanoide en la Tarea de Subir y Bajar Escaleras
Wilmer Cardenas Pilatuña, Félix Rodríguez Cañadillas, Alberto Jardón Huete

Control de posición/fuerza de un robot antropomórfico basado en control predictivo
J. de la Casa Cárdenas, J. Gámez García, J. Gómez Ortega

Hacia una arquitectura de exploración multirobot distribuida para entornos no controlados
Miguel Juliá, Oscar Reinoso, Luis Payá, Francisco Amorós, David Úbeda

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO HÁPTICO DE BAJA RESOLUCIÓN BASADO EN SMA PARA APLICACIÓN EN TELEROBÓTICA
Francisco Javier Tormo, Jaime Masiá, Juan Ramón Rufino, José Ferri, Borja Mansilla

Cálculo automático de secuencias de ensamblado basado en una técnica de agrupación para la construcción de estructuras mediante equipos de robots
Álvaro Sempere, Ivan Maza y Aníbal Ollero

Hacia una arquitectura de exploración multirobot distribuida para entornos no controlados

Miguel Juliá, Oscar Reinoso, Luis Payá, Francisco Amorós, David Úbeda
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández,
Avda. Universidad s/n, edif. Quorum V, 03202, Elche (Alicante), mjulia@umh.es

Resumen

Este artículo aborda el problema de la exploración de entornos desconocidos mediante un grupo de robots móviles. Con este objetivo, se presenta un modelo de arquitectura distribuida en la que se separa la planificación de trayectorias y la creación de mapas entre alto y bajo nivel. A bajo nivel, se emplea un mapa local con ventana deslizante capaz de adaptarse rápidamente ante situaciones cambiantes del entorno, sobre este mapa un sistema de comportamientos reactivos deciden la trayectoria de cada robot. A alto nivel, se procede a utilizar un sistema de grid-SLAM para cada robot con una alineación y fusión de los mapas obtenidos. En este sentido, una de las novedades del artículo es un sistema para obtener características de los mapas de ocupación que permitan realizar el alineado de los mismos para su posterior fusión basado en la transformada distancia del mapa de ocupación y el detector SIFT. El mapa creado de forma conjunta fusionando los mapas independientes es empleado a bordo de cada robot por un planificador de alto nivel que realiza una planificación a largo plazo. Se mostrará dicha arquitectura funcionando en simulación en entornos que modelan escenarios reales.

Palabras clave: exploración autónoma, fusión de mapas de ocupación, SLAM, entornos dinámicos, coordinación multirobot, arquitecturas de navegación.

1. Introducción

Uno de los problemas comunes en robótica móvil es el proceso de recorrer de forma autónoma un entorno desconocido creando un modelo del mismo [8]. Dicho proceso, que se conoce con el nombre de exploración autónoma, puede ser empleado simplemente en la fase inicial de la puesta en marcha de un sistema. Para ello, es necesario adquirir un mapa del entorno de modo que este se pueda usar posteriormente por los robots para localizarse y planificar sus trayectorias de acuerdo a la tarea que se requiera realizar. Dicho caso no tiene generalmente demasiados requerimientos, el tiempo de exploración no es algo crítico y, por lo tanto, no es necesario emplear múltiples robots para crear el mapa, incluso se podría utilizar teleoperación en lugar de un control de trayectorias automático. Además, suelen ser situaciones en las que se puede controlar el entorno, de modo que se puede evitar la aparición de elementos dinámicos en el rango del sensor y de ese modo se pueden emplear los típicos algoritmos de SLAM que asumen un entorno estático [7].

Sin embargo, existen otras aplicaciones donde la tarea a realizar se realiza simultáneamente durante el proceso de exploración. Ese es el caso, por ejemplo, de tareas de búsqueda, búsqueda y rescate, despliegue de redes de sensores, etc. Para estas tareas, el tiempo de exploración puede ser crítico y por lo tanto se puede obtener una gran ventaja del uso de múltiples robots móviles. Además en dichas tareas el robot debe adaptarse a un entorno no controlado donde pueden aparecer elementos dinámicos. Otro factor a tener en cuenta es la robustez del sistema, requiriendo normalmente que se pueda completar la tarea aun ante fallos en alguno de los robots.

En este artículo proponemos una arquitectura de exploración autónoma multirobot que pueda ser usada en este segundo tipo de situaciones donde el tiempo es un factor crítico, el entorno es no controlado y donde se requiere robustez ante fallos en alguno de los robots. La arquitectura propuesta integra diferentes sistemas previamente diseñados junto con nuevas aportaciones. Como principal característica el sistema propuesto está completamente distribuido sin existir ningún nodo común para todos los robots. Además, en cada robot se separa una parte de planificación de trayectorias y creación de mapas de bajo nivel de otra parte de alto nivel. En este sentido, a bajo nivel, empleamos un mapa local con ventana deslizante diseñado para adaptarse rápidamente ante cambios en el entorno. Este mapa es usado por el sistema de comportamientos reactivos que decide la trayectoria del robot. A alto nivel, un sistema de grid-SLAM se emplea para crear un mapa de ocupación para cada robot. Una de las novedades del artículo es un sistema para obtener características de los mapas de ocupación que genera

cada robot que permite realizar de forma robusta el alineado de los mismos para su posterior fusión. La extracción de características está basada en la transformada distancia del mapa de ocupación y el detector SIFT [12]. El mapa creado de forma conjunta fusionando los mapas independientes es empleado a bordo de cada robot por un planificador de alto nivel que realiza una planificación a largo plazo.

El resto del artículo se organiza de la siguiente forma. En la sección 2 se revisan algunos de los trabajos relacionados, en la sección 3 se muestra la arquitectura desarrollada. La sección 4 muestra algunos experimentos que simulan la el uso del sistema desarrollado. Acabamos en la sección 5 mostrando las conclusiones y las futuras líneas de investigación.

2. Trabajos Relacionados

Recientemente hemos desarrollado arquitecturas de exploración multirobot [10, 9]. En general, dichos modelos estaban enfocados hacia la integración del SLAM con la planificación de trayectorias para la exploración en lo que se conoce como algoritmos de exploración integrada. En este sentido, veníamos empleando un sistema de SLAM global en la que un único algoritmo de SLAM centraliza la creación del mapa. En concreto se creaba un mapa de marcas visuales obtenidas por un par estéreo que se iba actualizando con las medidas aportadas por cada uno de los robots. De esta forma, existe un único mapa de marcas visuales global que es compartido por todos los robots. La integración del SLAM con la exploración se realiza teniendo en cuenta la incertidumbre en la localización de cada robot según el algoritmo de SLAM para, en caso de ser esta demasiado elevada, hacer regresar al robot a posiciones previas por donde el robot navegaba con baja incertidumbre.

A la hora de planificar las trayectorias se requiere, además del mapa de marcas visuales, de un mapa de ocupación. Por este motivo se empleaba la localización evaluada por el SLAM visual para determinar un mapa de ocupación con las medidas de un sensor de rango. Dicho mapa de ocupación se utiliza para evaluar una serie de comportamientos reactivos que permiten al equipo de robots explorar el entorno [10]. Este modelo funciona correctamente para explorar las proximidades del robot pero presenta deficiencias para explorar entornos más complejos. En [9] se muestra una arquitectura híbrida que incorpora una planificación de alto nivel para solventar dichas deficiencias.

Esta arquitectura que acabamos de exponer presenta ciertos inconvenientes. Por una parte, es un modelo con un SLAM altamente centralizado y que además es necesario procesar a alta frecuencia dado que es necesario tener un mapa de ocupación actualizado para ser utilizado en el control de movimientos del robot a bajo nivel. Por este motivo, el SLAM era el principal cuello de botella en nuestros trabajos previos [10, 9].

Una alternativa para reducir este problema es emplear un mapa local para el control reactivo con una actualización independiente del SLAM global. Un ejemplo de este tipo de modelo se puede ver en [13]. De esta forma, ampliamos el tiempo de actualización necesario para el SLAM global dado que la planificación de alto nivel puede funcionar con un ciclo de trabajo superior.

El segundo problema es el hecho de realizar un SLAM conjunto con todos robots, lo cual supone un nodo centralizado cuyo coste computacional aumenta además significativamente con el número de robots. En general, hemos venido empleando dos tipos de algoritmos de SLAM: EKF-SLAM [1] y FastSLAM [6] ambos basados en marcas. El tiempo de actualización del EKF es cuadrático con el número de marcas en el mapa y lineal con el número de observaciones y por lo tanto lineal con el número de robots. De esta forma el EKF es más escalable ante el número de robots pero poco escalable en cuanto al tamaño del mapa. Además, tiene el inconveniente de que es muy sensible a la asociación de datos y una mala correspondencia puede hacerle fallar. FastSLAM es más robusto a la asociación de datos y viene a ser el caso opuesto, es más escalable frente al tamaño del mapa, dado que cada marca se actualiza de forma independiente, pero es muy dependiente del número de robots debido a que, para mantener una distribución de partículas que represente de forma precisa la incertidumbre, el número de partículas necesario tiene una dependencia exponencial con el número de robots.

Dados los problemas de escalabilidad y considerando además que un modelo distribuido es más robusto ante fallos, la alternativa es emplear un SLAM independiente en cada robot y emplear un alineamiento y fusión de mapas [3]. El único problema de introducir este modelo es que el modelo de SLAM cambia sensiblemente respecto al SLAM conjunto. En primer lugar, un robot deja de poder emplear las medidas de los otros robots para localizarse. En segundo lugar, no hay un cierre de bucles entre robots, sólo un alineamiento y fusión. Por lo tanto, si hay varias zonas donde los mapas de los robots se solapen el mapa fusionado puede presentar un cierto error. A pesar de ello, consideramos que para muchas aplicaciones esto podría no suponer un factor crítico.

Por último, como se ha comentado en la introducción, también es importante que el sistema funcione bien ante la presencia de elementos dinámicos. El hecho de emplear un mapa local con un ciclo de actualización alto para el control de movimientos a bajo nivel supone que se pueden considerar dichos elementos dinámicos sin problema en cuanto al control de movimientos siempre que la dinámica del entorno no sea tan extrema que bloquee por completo las opciones de navegación del robot. Sin embargo, la presencia de elementos dinámicos puede introducir error en el SLAM global. Un ejemplo de esto es cuando varios robots navegan juntos y uno se localiza respecto del otro en lugar de respecto al entorno estático. Ante este problema se han desarrollado algoritmos de SLAM que separan la parte estática de la dinámica del entorno [17].

3. Arquitectura Desarrollada

3.1. Descripción

La figura 1 muestra la arquitectura que proponemos. Como se puede observar en ella dividimos no solo el control de movimientos en alto y bajo nivel sino también la creación de mapas. A bajo nivel, un mapa de ocupación de reducidas dimensiones y que se mueve con el robot como una ventana deslizante se actualiza con alta frecuencia y es empleado por los comportamientos reactivos. A alto nivel, el planificador trabaja con el mapa fusionado de los mapas creados por algoritmos de SLAM global independientes en cada robot que son recibidos a través de la red.

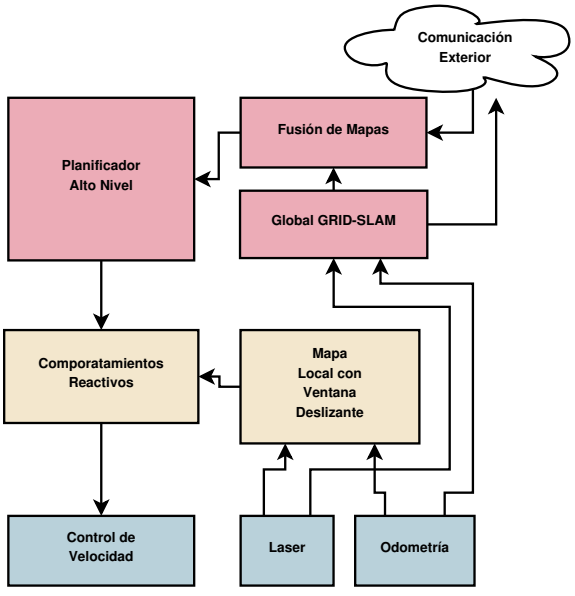

Figura 1: Arquitectura de un robot del equipo.

A continuación se analizan cada uno de estos elementos que componen la arquitectura.

3.2. Comportamientos Reactivos

La capa reactiva de nuestra arquitectura combina varios comportamientos básicos que controlan el proceso de exploración. Tomando como base modelos de comportamientos de otros autores [11], en [10] proponíamos el siguiente conjunto de comportamientos para realizar exploración integrada:

- Ir a fronteras
- Ir a zonas no exploradas
- Evitar obstáculos
- Evitar otros robots
- Ir a pose precisa
- Ir a destino

Mediante el comportamiento de *ir a fronteras* se persigue ir a las celdas de frontera que son aquellas celdas situadas en el límite entre las celdas no ocupadas del mapa de ocupación y las celdas desconocidas. Además, con el comportamiento de *ir a zonas no exploradas* damos preferencia a las celdas de frontera que tienen un mayor número de celdas no exploradas detrás introduciendo así un sentido de utilidad. El comportamiento de *evitar obstáculos* se emplea para evitar colisiones y el de *evitar otros robots* se utiliza para dispersar a los robots en el entorno introduciendo así una coordinación de bajo nivel. El comportamiento de *ir a pose precisa* hace al robot acudir a poses por donde ha pasado anteriormente en las que estaba localizado con baja incertidumbre. El último comportamiento, *ir a destino*, atrae al robot hacia una posición determinada por el planificador de alto nivel.

Cada uno de estos comportamientos se modela con un campo de potencial formado por una suma de Gaussianas. De este modo para el comportamiento i y para cada posición x se corresponde un campo de potencial:

$$P_i(\vec{x}) = A_i \sum_{j \in N_i} \exp\left(-\frac{||\vec{p_j} - \vec{x}||^2}{2\sigma_i^2}\right), \qquad (1)$$

donde A_i y σ_i son los parámetros de amplitud y ancho de la Gaussiana que se ajustan de modo experimental, N_i es el subconjunto de celdas a las que se refiere el comportamiento (por ejemplo, celdas de frontera para *Ir a fronteras* o celdas ocupadas para el comportamiento *Evitar obstáculos*) y donde p_j es la posición de la celda j. Para evitar que al combinar varios comportamientos se formen mínimos locales, solo se incluyen en N_i aquellas celdas que no están situadas detrás de obstáculos,

es decir aquellas que están visibles desde la posición del robot hasta una determinada distancia d_N que se fija como superior al rango del sensor láser $d_N > d_l$ para que de esta forma se incluyan celdas no exploradas como se explica en [9].

A continuación, el campo de potencial global se compone de la siguiente forma:

$$P(\vec{x}) = \sum \mu_i P_i(\vec{x}), \tag{2}$$

donde μ_i son términos binarios que son empleados por el planificador de alto nivel para habilitar o deshabilitar cada comportamiento de forma individual.

Finalmente, los comandos de velocidad para el robot se determinan mediante un controlador que hace al robot seguir la dirección del gradiente del campo de potencial combinado de todos los comportamientos $-\nabla P(\vec{x})$, acudiendo así a las zonas de mínimo potencial.

3.3. Mapa Local con Ventana Deslizante

Para evaluar los comportamientos reactivos se utiliza un mapa local que se mueve con el robot siguiendo un modelo de ventana deslizante. El tamaño de dicho mapa debe ser tal que incluya toda la circunferencia de radio d_N que se emplea en los comportamientos. Además dicho mapa se debe de actualizar a una frecuencia considerable dado que forma parte del bucle de control del robot a bajo nivel y por lo tanto es indispensable para evitar colisiones. Por este motivo la actualización de este mapa es independiente de la del mapa global. Dadas la reducidas dimensiones de este mapa no es necesario un algoritmo de SLAM complejo que permita cerrar bucles. Si la odometría es buena se puede trabajar directamente con esa localización para actualizar este mapa. Cuando la ventana deslizante del mapa se mueve a una zona que ya fue incluida en el mapa global es posible inicializar las celdas que se deben incluir en el mapa como consecuencia de desplazar la ventana a los valores que figuren en el mapa global creado por el SLAM.

Otro factor importante es que el mapa permita actualizar rápidamente a los valores que está recibiendo el sensor. En muchos algoritmos de creación de mapas de ocupación, una vez que la probabilidad de ocupación de una celda converge a ocupada o a libre es muy complicado que cambie su valor. En este sentido, queremos un sistema de actualización del mapa que permita a una celda cambiar su valor con relativa facilidad pero que al mismo tiempo permita filtrar el ruido del sensor. De esta forma el sistema se comportará bien incluso ante situaciones cambiantes en el entorno. Por este motivo, empleamos un modelo de actualización del mapa basado en el cociente entre el número de veces que una celda ha sido detectada como obstáculo por el láser y el total de veces que ha sido escaneada pero considerando un número limitado de medidas.

El algoritmo 1 resume como se actualiza el mapa de ocupación local. Para cada lectura del láser se determinan las celdas por las que pasan cada uno de los rayos del láser. En cada celda se realiza una operación de *limpiar* excepto en la última celda donde el láser alcanza el obstáculo para la cual se realiza la operación de *marcar* (salvo que se exceda el rango del láser, en cuyo caso no hay obstáculo). El valor de ocupación para cada celda es:

$$P_{oc}(\vec{x}) = \frac{\#hits}{\#total}. \tag{3}$$

Algorithm 1 Actualización del mapa local.

```
1: if limpiar then
2:   if total < umbral then
3:     total++
4:   else if hits > 0 then
5:     hits−−
6:   end if
7: else if marcar then
8:   if total < umbral then
9:     total++
10:    hits++
11:  else if hits < umbral then
12:    hits++
13:  end if
14: end if
```

El parámetro *umbral* en el algoritmo nos permite fijar cómo de rápido puede cambiar una celda de estar ocupada a estar libre o viceversa. Si el *umbral* no es excesivamente bajo además también estaremos filtrando el ruido del sensor. Otro dato interesante de utilizar este modelo es que nos permite trabajar con una cantidad de memoria reducida, ya que en general no se requieren más que 2 bytes para cada celda, uno para el contador *hits* y el otro para el *total*, aunque en este caso no es relevante dadas las reducidas dimensiones del mapa.

3.4. Planificador de alto nivel

Para el planificador de alto nivel utilizamos el modelo de subdivisión del entorno en árbol y su posterior análisis propuesto en [9]. Dicho árbol $T\langle nodos, aristas\rangle$ se crea situando el nodo raíz en la posición del robot y consiste en una serie de nodos $N_i(c_i, \rho_i, R_i, \gamma_i)$ y aristas $E_{l,m}(d_{l,m}, N_l, N_m)$. Cada nodo N_i representa una posición c_i en el entorno, el coste total para alcanzar dicho nodo ρ_i, una región asociada al nodo R_i, y el número

de otros robots γ_i presentes en dicha región. Cada arista $E_{l,m}$ representa el camino en línea recta que conecta los nodos N_l y N_m requiriendo viajar una distancia $D_{l,m}$.

Para evaluar este árbol, se da un beneficio $B(N_l)$ a cada nodo hoja del árbol N_l:

$$B(N_l) = \frac{\text{ICells}(R_l)}{\rho_l^2}, \tag{4}$$

siendo $\text{ICells}(R_l)$ una función que cuenta el número de celdas de interés dentro de la región R_l. Si el robot está bien localizado las celdas de interés serán las celdas no exploradas, mientras que si el robot presenta una pobre localización se considerarán como celdas de interés aquellas posiciones por donde el robot ha pasado previamente cuando estaba localizándose con un buen grado de certidumbre. A continuación, la siguiente función recursiva $V(N_b)$ da un valor para cada nodo N_b del árbol:

$$V(N_b) = \begin{cases} \frac{\text{máx}_j\, V(N_j)}{1+\gamma_i} & \text{si } N_b \text{ es rama} \\ B(N_b) & \text{si } N_b \text{ es hoja} \end{cases} \tag{5}$$

siendo j el subconjunto de nodos para los cuales existe una arista $E_{b,j}$ conectando el nodo N_b con el nodo N_j y siendo $b < j$, es decir, cada nodo N_j es un nodo hijo de N_b.

Como la ecuación (5) no considera la posible presencia de otros robots en la región asociada al nodo raíz, los nodos de primer nivel varían sus valores de la siguiente forma:

$$V'(N_f) = \frac{V(N_f)}{d^{\gamma_0}(c_0, c_f)} \prod_{r=0}^{\gamma_0} d(c_0^r, c_f), \tag{6}$$

donde c_0^r es la posición del robot r, y f denota el subconjunto de nodos de primer nivel, es decir los nodos hijos del nodo raíz. De esta forma los nodos que están más lejos de otros robots presentes en la región del nodo raíz aumentan su valor.

Finalmente, el mejor nodo de primer nivel N_g se obtiene como aquel que presenta un valor máximo:

$$N_g = \arg\max_{N_f} V'(N_f). \tag{7}$$

El mejor nodo de primer nivel N_g nos permite decidir en qué estado hacer trabajar a la capa de comportamientos reactivos de bajo nivel. Para ello, nos basamos en el estado de la localización (buena o pobre) y en el tipo de este nodo N_g (nodo hoja o nodo rama). Cuando la localización es buena y el mejor nodo es de tipo rama, se activará el comportamiento de *ir a destino* indicando como objetivo la celda c_g asociada a dicho nodo, además del comportamiento *evitar obstáculos* para evitar colisiones. Sin embargo, en caso de ser el mejor nodo de tipo rama, se utiliza una combinación de comportamientos para explorar el entorno local activando los comportamientos: *ir a fronteras*, *ir a zonas no exploradas*, *evitar otros robots* y *evitar obstáculos*. Para acabar, falta contemplar el caso de que el robot esté pobremente localizado. En este caso, si el mejor nodo es de tipo rama, se activará de nuevo la combinación de *evitar obstáculos* junto con *ir a destino* indicando como objetivo la celda c_g asociada a dicho nodo. Por otro lado, si el mejor nodo fuera de tipo rama, combinaríamos los comportamientos de *ir a poses precisas* con *evitar obstáculos*.

3.5. Grid-SLAM Global

A la hora de realizar el SLAM global que debe llevar a cabo cada robot de forma independiente hemos encontrado problemas dado que a nuestro saber no hay algoritmos de código abierto que estén diseñados para operar en entornos dinámicos. Hemos realizado pruebas empleando el software gmapping [7] consistente en un filtro de partículas Rao-Blackwellized con los datos de láser que emplea la observación a la hora de realizar cada nuevo muestreo para hacer un mejor uso de las partículas y de esta forma obtener buenos resultados con un número de partículas bajo. Dicha técnica funciona muy bien en entornos estáticos, sin embargo, presenta un error considerable en entornos dinámicos. Al situar a dos robots en posiciones próximas, el láser de uno de los robots puede incidir sobre el segundo robot. Esto produce que el primer robot se localice con respecto al segundo, y al moverse el segundo se introduce un error en la localización del primero y por lo tanto en el mapa que está creando, dado que gmapping asume un entorno estático.

De esta forma, esto queda como un punto a mejorar en el sistema. Algunas de las propuestas al respecto son [17, 14, 16].

3.6. Fusión de Mapas

El siguiente paso es poder alinear y fusionar los mapas de ocupación que crea cada uno de los robots de forma independiente. Para el alineamiento es interesante que los robots empiecen la exploración en posiciones cercanas. El motivo de esto es que es imprescindible que exista una parte en común entre los mapas creados por los diferentes robots para poder realizar el alineamiento. Si el alineamiento es correcto desde el principio del proceso de exploración, los robots podrán coordinarse de una forma más eficiente.

Para realizar dicho alineamiento, elegimos una serie de puntos característicos del mapa, a continua-

ción haremos la correspondencia entre los puntos de los distintos mapas y evaluamos la traslación y rotación entre dichos puntos que será empleada para poder fusionar los mapas.

A la hora extraer los puntos característicos del mapa, no funcionan bien los típicos detectores de puntos como SIFT o SURF [5] aplicados directamente sobre el mapa de ocupación. En su lugar, empleamos la transformada distancia del mapa de ocupación en la que cada píxel toma como valor la distancia mínima a la celda ocupada o desconocida más cercana. Aplicando el detector de características SIFT [12] sobre la transformada distancia obtenemos unos puntos muy robustos que permiten hacer fácilmente la correspondencia y posterior alineamiento.

La Figura 2 muestra este problema. Como se puede observar, en ella se muestran los mapas que están siendo creados de forma independiente por dos robots durante el proceso de exploración del entorno. En la parte superior se muestran los puntos extraídos por SIFT en los mapas correspondientes a cada robot. Como se puede ver, SIFT extrae muchos puntos que son bastante ruidosos y sobre los que es difícil encontrar correspondencias de forma fiable. En la parte inferior se ha calculado la transformada distancia y aplicado SIFT sobre la imagen resultante. Se puede observar que SIFT ahora extrae un número menor de puntos pero estos son mucho más robustos y es sencillo encontrar correspondencias entre ambas imágenes.

Una vez obtenidas las características y evaluados sus descriptores SIFT aplicamos una técnica de alineamiento como las presentadas en [2] y procedemos a fusionar los mapas empleando la transformación entre mapas obtenida en el alineamiento.

4. Simulación

Hemos realizado experimentos sobre el simulador Stage [4] implementando cada uno de los módulos de la arquitectura descrita sobre ROS [15]. El sistema funciona en tiempo real. El mapa local con ventana deslizante se actualiza a 10Hz y el control reactivo da comandos de velocidad a 7Hz. El grid SLAM actualiza un mapa de 60x60 metros con una resolución 0.05 cm cada 2 segundos mientras que el tiempo para fusión de mapas es de unos 14-15 segundos. Este tiempo se puede reducir a la mitad empleando SURF en lugar de SIFT pero hemos observado que SIFT ofrece mejores resultados. El planificador de alto nivel puede funcionar con un ciclo de hasta unos 20-25 segundos aproximadamente en función de la complejidad del mapa explorado hasta el momento.

A continuación mostramos un ejemplo de los mapas individuales creados por dos robots y el mapa fusionado empleando la arquitectura propuesta. Como se puede observar cada robot explora una parte distinta del entorno. A pesar de tener sólo una pequeña parte en común los dos mapas, estos se alinean y se crea el mapa global fusionando ambos.

Sin embargo, dado que pueden existir errores o incertidumbre en el SLAM, se puede apreciar como el mapa global fusionado presenta un cierto error en la esquina inferior izquierda donde como se puede observar no coinciden los mapas de ambos robots. La mayoría de los puntos encontrados en común entre ambos mapas pertenecen a la parte de la derecha del entorno donde los robots comenzaron la exploración. Dicha región se encuentra perfectamente alineada, sin embargo, en la parte opuesta se produce el error a la hora de cerrar el bucle que forma el pasillo principal.

En este sentido, podemos ver que el alineamiento entre los mapas aporta una cierta información que no está siendo considerada por el SLAM ya que este trabaja de manera independiente.

5. Conclusiones

Hemos mostrado una arquitectura en la un equipo de robots explora un entorno de forma totalmente distribuida. Este sistema integra trabajos realizados previamente e incluye como novedad una forma robusta de obtener el alineamiento de mapas de ocupación.

Como trabajos futuros hemos visto que habría que mejorar el SLAM de alto nivel en dos sentidos. En primer lugar, considerar que pueden existir elementos dinámicos en el entorno, y en segundo lugar incluir la información de alineamiento con el mapa del otro robot para reducir la incertidumbre del mapa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el Gobierno de España (Ministerio de Ciencia e Innovación) 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] T Bailey. *Mobile Robot Localisation and Mapping in Extensive Outdoor Environments.* PhD thesis, 2002.

[2] Monica Ballesta, Arturo Gil, Oscar Reinoso, Miguel Juliá, and Luis M. Jiménez.

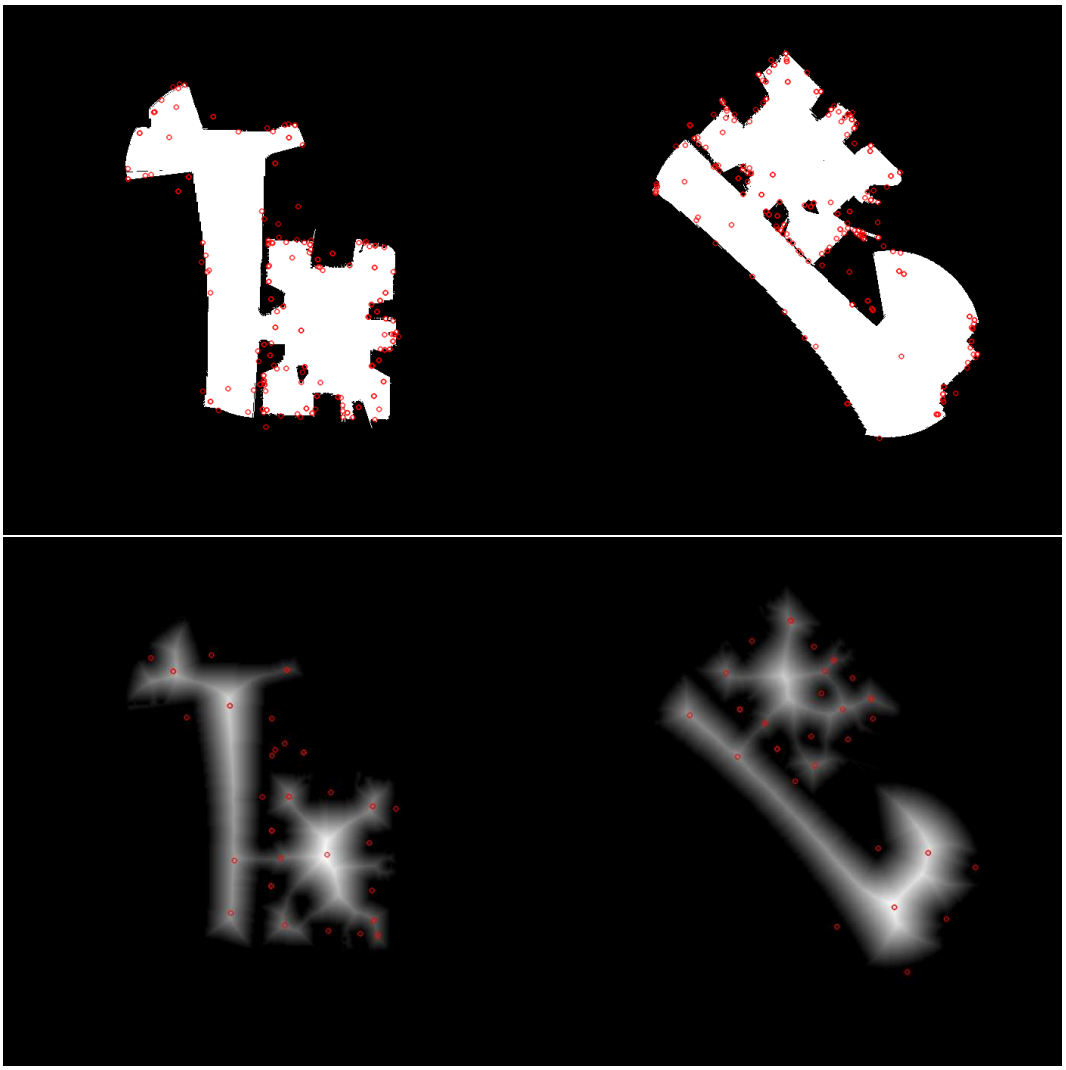

Figura 2: Detección de características. Sobre el mapa de ocupación en la parte superior y sobre la trasformada distancia en la parte inferior para los mapas creados por dos robots (derecha e izquierda).

Multi-robot map alignment in visual SLAM. *WSEAS Transactions on systems*, 9(2):213–222, 2010.

[3] D. Fox, J. Ko, B. Limketkai, D. Schulz, and B. Stewart. Distributed multi-robot exploration and mapping. *Proc. of the IEEE*, 94(7):1325–1339, 2006.

[4] B. Gerkey, R. Vaughan, and A. Howard. The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems. In *Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2003)*, 2003.

[5] A. Gil, O.M. Mozos, M. Ballesta, and O. Reinoso. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM. *Machine Vision and Applications*, 21(6), 2010.

[6] A. Gil, O. Reinoso, M. Ballesta, M. Juliá, and L. Payá. Multi-Robot Visual SLAM using a Rao-Blackwellized Particle Filter. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(1):68–80, 2010.

[7] G. Grisetti, C. Stachniss, and W. Burgard. Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters. *Robotics, IEEE Transactions on*, 23:34–46, 2007.

[8] M. Juliá, A. Gil, and O. Reinoso. A Comparison of Path Planning Strategies for Autonomous Exploration and Mapping of Unknown Environments. *Autonomous Robots*, 33(4):427–444, 2012.

[9] M. Juliá, O. Reinoso, A. Gil, M. Ballesta, and L. Payá. A hybrid solution to the multi-robot integrated exploration problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(4):473–486, 2010.

[10] M. Juliá, O. Reinoso, A. Gil, M. Ballesta, and L. Payá. Behaviour Based Multi-Robot Integrated Exploration. *Int. Journal of Inno-*

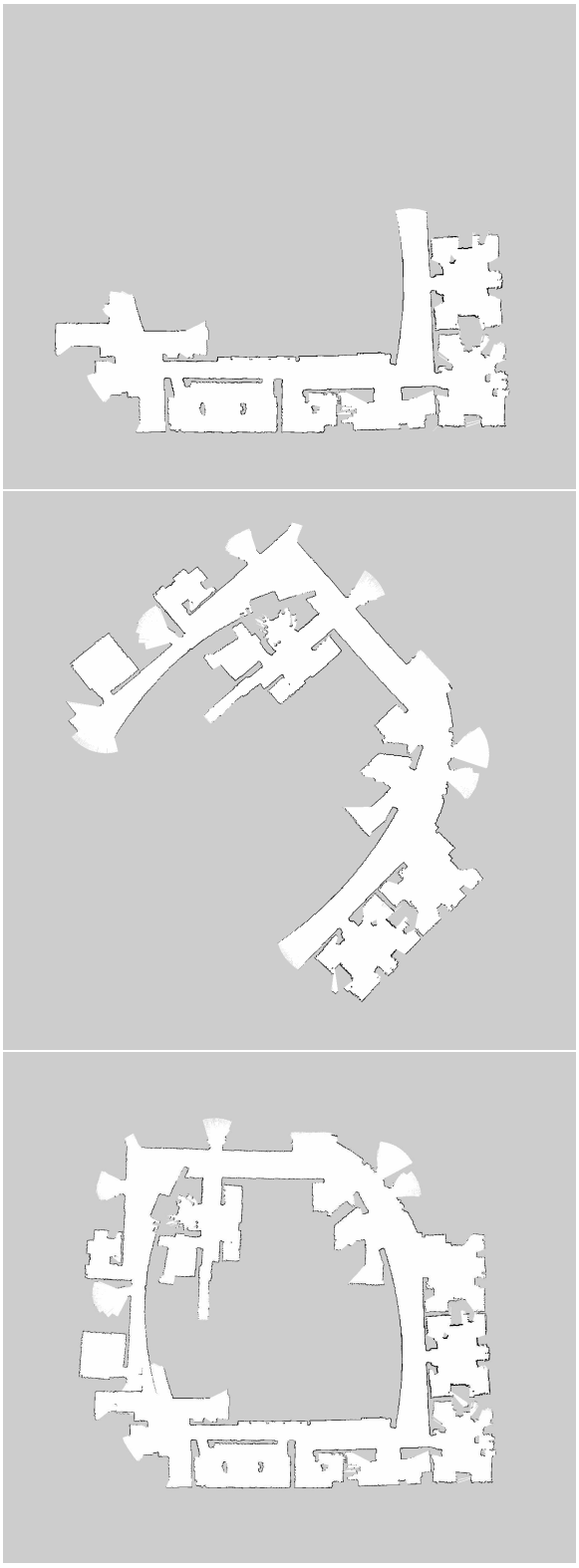

Figura 3: Fusión de mapas. Los dos mapas superiores corresponden con los mapas creados por dos robots, en la parte inferior se muestran estos dos mapas fusionados.

vative Computing, Information and Control, 7(9), September 2011.

[11] H. Lau. Behavioural Approach for Multi-Robot Exploration. In *Proc. of the Australasian Conf. on Robotics and Automation (ACRA'03)*, Brisbane, Australia, 2003.

[12] D. G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *Int. Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110, 2004.

[13] Eitan Marder-Eppstein, Eric Berger, Tully Foote, Brian P. Gerkey, and Kurt Konolige. The Office Marathon: Robust navigation in an indoor office environment. In *ICRA*, pages 300–307. IEEE, 2010.

[14] N.C. Mitsou and C.S. Tzafestas. Temporal occupancy grid for mobile robot dynamic environment mapping. In *Control Automation, 2007. MED '07. Mediterranean Conference on*, pages 1–8, 2007.

[15] M. Quigley, B. Gerkey, K. Conley, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler, and A. Ng. ROS: an open-source Robot Operating System. In *International Conference on Robotics and Automation*, 2009.

[16] Jari Saarinen, Henrik Andreasson, and Achim J. Lilienthal. Independent Markov chain occupancy grid maps for representation of dynamic environment. In *IROS*, pages 3489–3495. IEEE, 2012.

[17] Denis F. Wolf and Gaurav S. Sukhatme. Online Simultaneous Localization and Mapping in Dynamic Environments. In *ICRA*, pages 1301–1307. IEEE, 2004.