

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	
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>	

Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil

David Zúñiga-Noël, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno, Javier González Jiménez
 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, grupo MAPIR, Universidad de Málaga
 Instituto de Investigación Biomédica de Málaga (IBIMA)
 {dzuniga,rubengooj,famoreno,javiergonzalez}@uma.es

Resumen

La aparición de las cámaras RGB-D como sensores robóticos de bajo coste ha supuesto la inclusión habitual de varios de estos dispositivos en una creciente cantidad de vehículos y robots. En estos casos, la calibración precisa de las transformaciones espaciales existentes entre las cámaras del mismo robot es de capital importancia a la hora de obtener medidas fiables del entorno. Este artículo evalúa el método de calibración con fórmula cerrada descrito en [7] y lo extiende con una propuesta alternativa basada en un método iterativo y una extensión robusta de este último en dos escenarios: i) un entorno simulado con cambios en el nivel de ruido de las observaciones, en el número de observaciones obtenidas, en la proporción de outliers y en las posiciones relativas de las cámaras, y ii) una configuración particular de 3 cámaras RGB-D sobre un robot real. Los resultados de la evaluación muestran una mayor precisión para nuestra propuesta iterativa robusta en todos los escenarios analizados. El código fuente de la implementación de estos métodos en C++ se proporciona para su uso público.

Palabras clave: Calibración extrínseca, cámaras RGB-D, robots móviles.

1. Introducción

La aparición de las cámaras RGB-D ha supuesto una revolución en el mundo de los sensores robóticos debido a su bajo coste y la gran cantidad de información que pueden proporcionar sobre el entorno, combinando una cámara estándar RGB con una cámara especial (principalmente de proyección de patrones de infrarrojos o de tiempo de vuelo) que captura la información de profundidad de la escena.

Siendo una de las principales limitaciones de este tipo de dispositivos su relativamente bajo campo de visión ($\sim 60^\circ$ HFoV), es habitual encontrar sistemas que integran varias cámaras RGB-D funcionando simultáneamente sobre un mismo robot o vehículo [4, 13], aumentando de esta forma su rango de observación. Este tipo de configuraciones

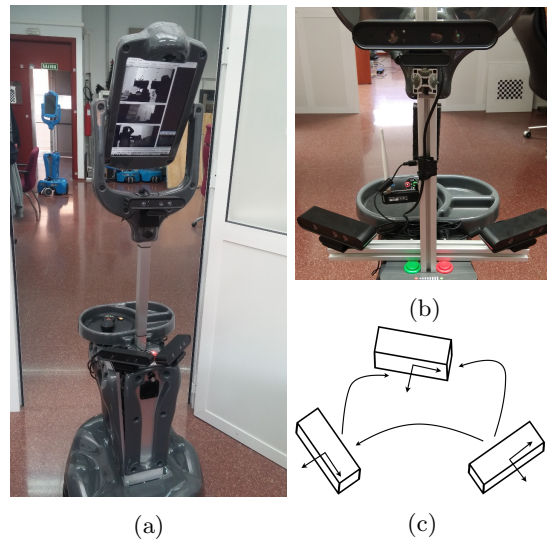


Figura 1: Figura con el robot *Giraff* y el conjunto de sensores RGB-D con los que se han llevado a cabo los experimentos (Figura 1a). En la Figura 1b se puede observar en detalle las tres cámaras montadas en el sensor, mientras que en la Figura 1c se puede observar el esquema del conjunto de cámaras con sus transformaciones relativas.

multi-cámara implican un proceso de calibración extrínseca de las mismas que determina su posición y orientación dentro de un sistema de referencia común elegido arbitrariamente al que se transforman las medidas tomadas por todas las cámaras, generando una observación precisa y coherente del entorno.

Es importante remarcar que esta calibración extrínseca de las configuraciones multi-cámara es independiente del proceso de calibración intrínseco (e.g. estimación de la distancia focal, parámetros de distorsión, etc.) de cada una de ellas, así como de la estimación de la transformación espacial existente entre la cámara RGB y de distancia que componen cada dispositivo individual [18, 6, 8]. Además, las cámaras RGB-D sufren de la aparición de errores en las medidas de rango en función de la distancia de los objetos medidos al centro óptico de la cámara de profundidad, requiriendo de un tratamiento especial para compensar dichos errores y obtener medidas fiables [14, 5].

Estos procedimientos de calibración son de capital importancia para obtener medidas precisas del entorno, reduciendo de esta manera los errores sistemáticos en las observaciones obtenidas.

En este artículo, sin embargo, asumimos que las cámaras ya se encuentran calibradas individualmente y nos centramos principalmente en la estimación robusta de las transformaciones geométricas existentes entre un conjunto de sensores RGB-D que forman un sólido rígido. Para ello extendemos el método propuesto en [7], que implementa una formulación cerrada para el caso específico de dos cámaras. Dicho método está basado en la observación de superficies planas desde diferentes perspectivas y tiene la ventaja de que puede ser aplicado de forma sencilla sin necesidad de un patrón de calibración pre-construido, ya que, habitualmente, los entornos creados por seres humanos presentan dichas superficies. De esta forma, el proceso de re-calibración puede ejecutarse en cualquier momento y prácticamente sin intervención humana. Sin embargo, la formulación cerrada propuesta se muestra muy sensible ante la presencia de medidas afectadas por mucho ruido y/o observaciones erróneas (*outliers*), por lo que se hace necesario el desarrollo de un método que pueda hacer frente de mejor manera a estas situaciones habituales en los experimentos con datos reales.

Así, las contribuciones de este trabajo se concretan en:

- La elaboración de un estudio de los resultados obtenidos por el método propuesto en dicho artículo, tanto en simulación como en un robot real.
- La propuesta de un método alternativo basado en una formulación iterativa y una versión robusta del mismo que obtiene mejores resultados incluso en presencia de *outliers* y/o medidas muy ruidosas.
- La publicación del código fuente en C++ que implementa los tres métodos evaluados.

Para la validación de los resultados, se han desarrollado dos tipos de pruebas (ver sección 5): i) en un entorno simulado en el que se ha analizado el comportamiento de los distintos sistemas propuestos e implementados ante distintos niveles de ruido, número de observaciones, proporción de *outliers* en las observaciones y posiciones relativas de los sensores y ii) con una configuración de tres cámaras sobre un robot real donde se han estimado las transformaciones relativas entre cada par de cámaras y se han comparado con las obtenidas por la composición de las otras dos transformaciones. En todos los casos se ha demostrado que el

método iterativo robusto presenta una mayor precisión a la hora de determinar la posición relativa entre cámaras.

Por último, el código fuente de las librerías de C++ desarrolladas en este artículo, junto con vídeos ilustrativos y demás material adicional, podrá ser encontrado en el siguiente enlace: <http://mapir.uma.es/>

2. Trabajos Relacionados

La necesidad de métodos de calibración extrínseca de sensores ha dado lugar a diversas propuestas, tanto genéricas [15] como para sensores específicos [8]. La mayoría de estos métodos de calibración pueden clasificarse en dos grandes grupos: *basados en el movimiento* o *basados en la observación simultánea de características*.

Los métodos *basados en movimiento* [15, 3, 19] consisten básicamente en estimar la relación espacial entre los sensores a partir de la trayectoria calculada para cada sensor independientemente. Si bien se trata de un enfoque genérico, puesto que únicamente requiere un algoritmo de odometría, puede ser una solución poco práctica. Una de las principales complicaciones que se presentan a la hora de aplicar estos métodos de manera automática es que el resultado de la calibración depende directamente de la precisión del algoritmo de odometría en que se base. Además, la precisión puede variar de un entorno a otro y según la cantidad de elementos dinámicos o estáticos presentes.

Por el contrario, los *métodos basados en la observación simultánea de características* [10, 17, 8] consisten en detectar correspondencias entre elementos del entorno percibidos simultáneamente por los sensores, a partir de las cuales se estima la relación espacial entre dichos sensores. En general, estos métodos, a diferencia de los basados en movimiento, necesitan de una región de observación común a los sensores para poder establecer las correspondencias. Además, las características del entorno en base a las que se formulan estas soluciones deben aparecer con suficiente frecuencia para poder realizar el procedimiento de calibración de manera autónoma en un robot móvil.

El método [7] en el que se basa este trabajo entraría dentro de esta última categoría, empleando regiones planas como características sobre las que establecer las correspondencias. Este planteamiento, en caso de que las regiones sean suficientemente grandes, relaja la restricción de *observación simultánea* a la observación de un mismo plano, pero no necesariamente la misma región del plano. Esta característica permite minimizar la región de solape entre los sensores, maximizando de esta for-

ma el campo de visión. Además, la abundancia de regiones planas en entornos creados por el ser humano permite asegurar la presencia de las características en el entorno de trabajo necesarias para llevar a cabo el proceso de calibración.

Sin embargo, como ya hemos comentado, el planteamiento original [7] se ve afectado considerablemente por el ruido de las medidas y la presencia de *outliers* en las observaciones. Para mitigar estos efectos, en este trabajo se aplican técnicas de optimización robusta que permiten obtener mayor precisión en estas condiciones.

3. El Robot *Giraff*

Giraff es un robot móvil diseñado con fines asistenciales que está basado en una plataforma robótica con un PC a bordo y una pantalla táctil ajustable en altura y orientación que se utiliza como principal interfaz de interacción con el usuario (ver Figura 1a).

3.1. Hardware

La plataforma robótica consta de dos ruedas motoras y dos ruedas libres situadas una en la parte delantera y otra en la trasera con el fin de mejorar la estabilidad del movimiento y permitir que el robot gire sobre sí mismo. El conjunto de sensores del robot se compone de una cámara web de 5 Mpx situada en la parte superior de la pantalla táctil con la que se puede transmitir video a un usuario remoto o detectar y reconocer tanto personas como objetos. En la parte delantera del robot se han colocado dos cámaras RGB-D con el objetivo de ampliar el campo de visión del robot para el mapeado, la localización y la navegación. La posición de las cámaras se ha escogido de manera que las vistas de ambos sensores no se solapen pero que tengan una visión del suelo en todo momento. Otra cámara RGB-D situada a una altura mayor se utilizará para el reconocimiento de gestos, como método alternativo de interacción entre el usuario y el robot.

3.2. Software

El PC de a bordo de *Giraff* está basado en Linux Ubuntu 16.04 e integra un entorno ROS donde se implementan las funcionalidades y los comportamientos del robot: navegación autónoma, detección y reconocimiento de caras y gestos, análisis y síntesis de voz, etc. Dentro de esta arquitectura se integra el módulo de auto-calibración que implementa el método descrito en este artículo.

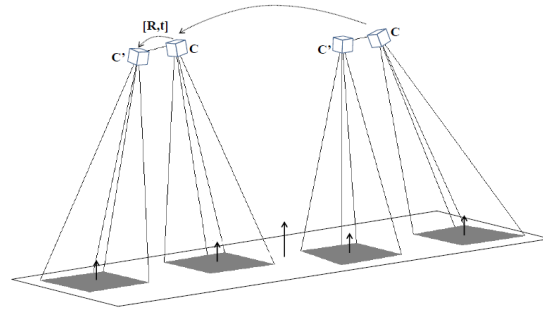


Figura 2: Figura adaptada de [7] con el esquema de calibración empleado en este trabajo, en el que dos sensores RGB-D unidos rígidamente por una transformación $T = [R|t]$ observan en distintas configuraciones el mismo plano.

4. Calibración Extrínseca de Cámaras RGB-D

En esta sección se describen los algoritmos de calibración desarrollados en este artículo, tras introducir brevemente el problema que vamos a resolver.

4.1. Planteamiento del Problema

Esencialmente, el objetivo es encontrar la transformación geométrica relativa $T = [R|t] \in SE(3)$ entre dos sensores RGB-D, suponiendo que están unidos rígidamente (ver Figura 2). Para ello, se obtendrá una serie de N distintas observaciones de uno o más planos, dadas por su vector normal \mathbf{n}_i en el sistema de referencia de cada cámara y la distancia desde el centro óptico de éstas al plano d_i . Una vez obtenidas las observaciones, suponiendo que cumplen la condición de observabilidad, dada por:

$$\text{rango}\left(\sum_{i=1}^N \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T\right) = 3 \quad (1)$$

se puede encontrar la solución óptima al problema (esto es, estimar la pose relativa entre los diferentes sensores) de diferentes maneras. Para que se cumpla la condición de observabilidad, al menos 3 observaciones independientes son necesarias [7]

4.2. Solución en Forma Cerrada

En este apartado, se describirá someramente la solución en forma cerrada al problema planteado presentada previamente en [7] que desacopla la estimación de la traslación con respecto de la rotación, comenzando por la estimación de la rotación \mathbf{R} . Para ello, el estimador de máxima verosimilitud viene dado por la maximización de la verosimilitud logarítmica, asumiendo que los errores

siguen una distribución normal, para las N observaciones:

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{R}} \left\{ \log \prod_{i=1}^N p(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_i | \mathbf{R}) \right\} \quad (2)$$

donde las primas en los superíndices denotan observaciones del segundo sensor. Entonces, gracias a la hipótesis de que los errores son Gaussianos, podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^N \omega_i \|\mathbf{n}_i - \mathbf{R}\mathbf{n}'_i\|^2 \quad (3)$$

observando que la derivación del estimador de máxima verosimilitud coincide con el problema de mínimos cuadrados justamente introducido. La ecuación anterior es también conocida como problema ortogonal de Procrustes y su solución en forma cerrada es conocida [1, 16].

En el caso de la traslación, es posible llegar fácilmente a la siguiente expresión:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{t}} \left\{ \omega_i (d_i - d'_i + \mathbf{t} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{n}'_i)^2 \right\} \quad (4)$$

que, al igual que en el caso anterior, corresponde el estimador de máxima verosimilitud:

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{t}} \left\{ \log \prod_{i=1}^N p(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_i, d_i, d'_i, \mathbf{R} | \mathbf{t}) \right\} \quad (5)$$

con el problema de mínimos cuadrados presentado, cuya solución es sencilla de recuperar (consultar [7] para más detalles).

4.3. Solución con Mínimos Cuadrados

El problema de la solución anteriormente presentada, llega en presencia de observaciones muy ruidosas y/o *outliers*, ya que es muy sensible a estos fenómenos. Por ello, en este artículo proponemos su resolución de forma robusta mediante los problemas de mínimos cuadrados planteados en (3) y (4). Escribiendo dichas ecuaciones en una misma expresión de forma matricial, se puede llegar a:

$$\operatorname{argmin}_{\xi} \left\{ \left[\begin{array}{c} \mathbf{n}_i \\ d_i - d'_i \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \mathbf{R} \\ -\mathbf{t}^T \mathbf{R} \end{array} \right] \mathbf{n}'_i \right\}^2 \quad (6)$$

donde $\xi \in \mathfrak{se}(3)$ es el vector que define la transformación relativa en la variedad 6-dimensional $\mathfrak{se}(3)$, conocida como álgebra de Lie, del espacio de las transformaciones Euclídeas de forma que se cumple $\mathbf{T}(\xi) \in SE(3)$.

Si se observa la segunda parte de la expresión (6), es posible relacionarla con la traspuesta de la inversa de la matriz de transformación 3×4 existente

entre los dos sensores, esto es:

$$\xi^* = \operatorname{argmin}_{\xi} \left\{ \left[\begin{array}{c} \mathbf{n}_i \\ d_i - d'_i \end{array} \right] - \mathbf{T}(\xi)^{-T} \mathbf{n}'_i \right\}^2 \quad (7)$$

donde ξ^* se refiere al valor óptimo estimado. En lugar de resolver la expresión anterior de forma cerrada, se va a resolver el problema mediante el algoritmo iterativo Levenberg-Marquardt [11] de común uso en robótica [9]. Dicho algoritmo requiere de la estimación de la matriz Jacobiana del error minimizado, o dicho de otro modo:

$$\mathbf{J}(\xi) = \left. \frac{\partial \mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta\xi)}{\partial \Delta\xi} \right|_{\Delta\xi=0} \quad (8)$$

donde el operador \oplus es la composición de poses y el error \mathbf{e}_i se refiere a:

$$\mathbf{e}_i(\xi) = \left[\begin{array}{c} \mathbf{n}_i \\ d_i - d'_i \end{array} \right] - \mathbf{T}(\xi)^{-T} \mathbf{n}'_i \quad (9)$$

tras lo cual se puede obtener el valor óptimo de la transformación relativa entre los dos sensores ξ^* . Para mayor detalle en la matemática relacionada con la geometría Euclídea recomendamos al lector consultar [2].

Por último, similarmente al método presentado en [12], se puede mejorar el comportamiento de la solución (7) ante observaciones ruidosas y/o *outliers*. Para ello, en lugar de utilizar la norma Euclídea, muy sensible a los grandes errores introducidos por las observaciones ruidosas, se ha utilizado la siguiente función robusta:

$$\xi^* = \operatorname{argmin}_{\xi} \rho(\|\mathbf{e}_i(\xi)\|^2) \quad (10)$$

donde $\rho(s) = \log(1 + s)$. En consecuencia, la matriz Jacobiana en (8) puede ser expresada como:

$$\mathbf{J}(\xi) = \left. \frac{\partial \rho(\|\mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta\xi)\|^2)}{\partial \mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta\xi)} \frac{\partial \mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta\xi)}{\partial \Delta\xi} \right|_{\Delta\xi=0} \quad (11)$$

que se puede relacionar fácilmente con el Jacobiano estimado anteriormente en (8).

5. Experimentos

Con el objetivo de analizar y comparar la solución original con las modificaciones propuestas en este trabajo, se ha llevado a cabo una serie de experimentos empleando tanto datos simulados (Sección 5.1) como datos reales (Sección 5.2) obtenidos mediante cámaras RGB-D montadas sobre el robot *Giraff*.

5.1. Entorno Simulado

Para la evaluación con datos simulados, se ha generado un conjunto de $N = 100$ transformaciones conocidas $T \in SE(3)$ entre los dos sensores, variando la traslación en el rango $[0.5, 1.5]$ m y la rotación en el rango $[-45, 45]$ °, ambos en el álgebra de Lie $\mathfrak{se}(3)$. Las observaciones en el espacio se han obtenido distribuyendo uniformemente los valores de traslación en ± 3 m y rotación en $\pm 180^\circ$, para uno de los sensores, de forma que se cumpla la condición de observabilidad (1).

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo presentado ante el máximo número de fenómenos posibles en casos reales, se han simulado variaciones en los siguientes parámetros:

- Número de observaciones de planos N_{obs} .
- Nivel de ruido del sensor K_σ .
- Porcentaje de *outliers* R_{out} ,

en los rangos presentados en las Figuras 3, 4 y 5. Cada experimento, dada una configuración de sensores, se ha repetido un número de 100 veces dando lugar a un total de 10000 simulaciones para cada configuración de parámetros $\{N_{obs}, K_\sigma, R_{out}\}$, teniendo en cuenta que los parámetros por defecto son $N_{obs} = 100$, $K_\sigma = 1$, y $R_{out} = 10\%$.

En el caso del ruido de sensor, se ha considerado a éste como Gaussiano, cuyo nivel varía en función de K_σ de la siguiente manera:

$$\mathbf{n} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_n, K_\sigma \Sigma_n), \quad d \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_d, K_\sigma \sigma_d^2) \quad (12)$$

donde $\boldsymbol{\mu}_n$ y $\boldsymbol{\mu}_d$ son los parámetros medios de observación del plano y Σ_n y σ_d son, respectivamente, estimaciones de la matriz de covarianza y desviación típica asociadas a los parámetros, empleando para ello valores representativos obtenidos empíricamente.

Los *outliers*, por otra parte, se han simulado introduciendo observaciones sin relación *a priori* con los parámetros de calibración extrínseca de los sensores. Para ello, se han sustituido los parámetros de una de las observaciones que forman cada correspondencia con parámetros de un plano extraídos de una distribución uniforme en todo el espacio de posibles observaciones considerado durante la simulación.

Para evaluar los algoritmos presentados en este trabajo, se ha empleado la distancia en la variedad 6-dimensional $\mathfrak{se}(3)$ entre las pose estimada y real, $\boldsymbol{\xi}^*$, $\boldsymbol{\xi}_r \in \mathfrak{se}(3)$ respectivamente, esto es:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\xi}^* \ominus \boldsymbol{\xi}_r = \log\left(\exp(\boldsymbol{\xi}^*)^{-1} \cdot \exp(\boldsymbol{\xi}_r)\right) \quad (13)$$

donde $\boldsymbol{\tau}$ y $\boldsymbol{\omega}$ son respectivamente las partes de traslación y rotación del vector $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathfrak{se}(3)$, y las funciones $\exp : \mathfrak{se}(3) \mapsto SE(3)$ y $\log : SE(3) \mapsto \mathfrak{se}(3)$ se encargan de relacionar el álgebra de Lie $\mathfrak{se}(3)$ y el espacio Euclídeo $SE(3)$.

En la Figura 3 se muestran los errores relativos tanto en rotación como en traslación (relativos a la transformación real; en tanto por uno) para un número variable de observaciones N_{obs} . En la gráfica se observa una ligera mejora en la precisión del algoritmo Levenberg-Marquardt robusto (LM-R) con respecto a la solución en forma cerrada (FC). La tendencia de los errores se vuelve asintótica a medida que aumenta el número de observaciones, esto es, a partir de un número de observaciones deja de ser beneficioso introducir nuevas medidas al estar incurriendo en un coste computacional más elevado para una mejora marginal en la precisión.

En cambio, en la Figura 4 se representan los errores relativos para un diferentes niveles de ruido K_σ , donde podemos observar que la solución con peor comportamiento es FC, seguida de LM y, de nuevo, la solución con mejor precisión vuelve a ser LM-R. Además, se puede observar como la solución FC empeora más que las que emplean Levenberg-Marquardt (LM y LM-R) a medida que aumenta el nivel de ruido en el sensor.

Por último, la Figura 5 presenta los errores para un porcentaje variable de *outliers*. En esta gráfica se puede observar de forma intuitiva cómo los algoritmos que no emplean ningún método para mejorar su robustez empeoran su comportamiento dramáticamente en función de la presencia de *outliers*, mientras que el método Levenberg-Marquardt robusto (LM-R) es capaz de realizar la calibración con un error entorno al 10%, tanto en traslación como en rotación, para un nivel de *outliers* del 50%.

5.2. Sobre el Robot *Giraff*

Finalmente, se ha evaluado el funcionamiento de los métodos analizados mediante un experimento en el cual se calibra extrínsecamente un conjunto de tres cámaras RGB-D montado sobre la plataforma robótica *Giraff* (ver Figura 1). Dicho experimento se llevó a cabo en un entorno de oficina, en el que se ha movido al robot de forma manual tomando como planos de referencia el suelo y las paredes, eludiendo de esta forma la necesidad de utilizar un patrón de calibración construido para tal efecto.

Dado que en este experimento no se dispone de la transformación real que actúe como *ground truth*, se han calculado las transformaciones relativas en-

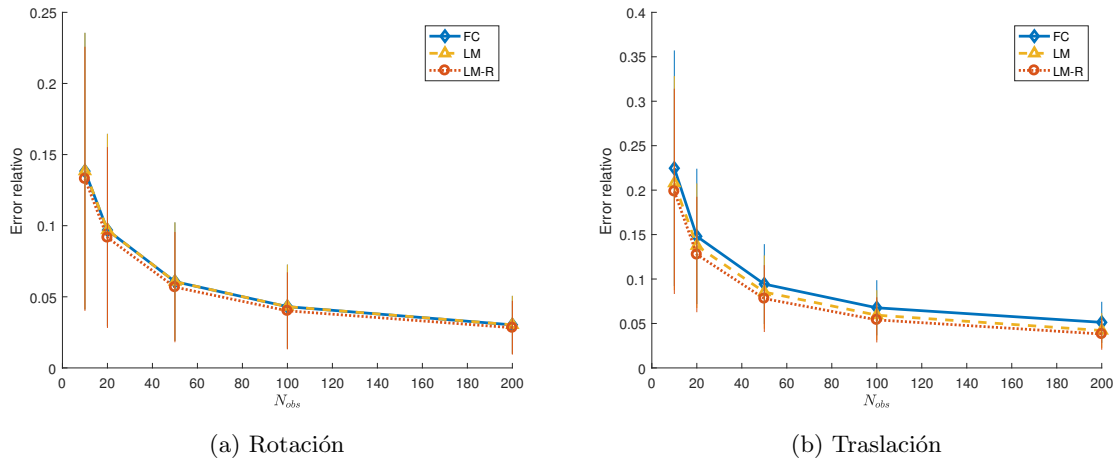


Figura 3: Resultados obtenidos en simulación variando el número de observaciones N_{obs} , para el error en la rotación (4a) y en la traslación (4b), expresado en términos de error relativo.

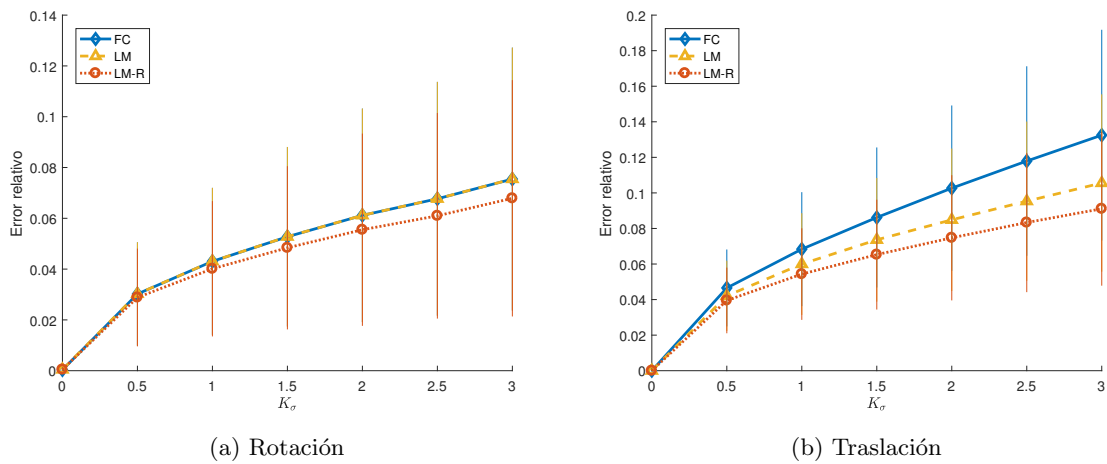


Figura 4: Resultados de simulación obtenidos variando el nivel de ruido K_σ , para el error en la rotación (4a) y en la traslación (4b), expresado en términos de error relativo.

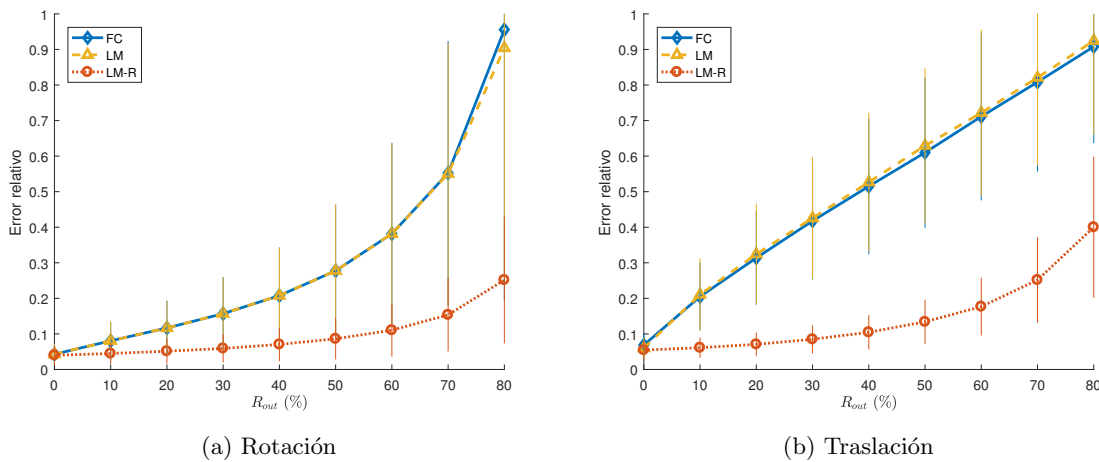


Figura 5: Resultados obtenidos variando la proporción de *outliers* R_{out} , para el error en la rotación (4a) y en la traslación (4b), expresado en términos de error relativo.

tre pares de cámaras ($\xi_0^1, \xi_0^2, \xi_2^1$) y se han comparado las transformaciones estimadas con las obtenidas mediante la composición de las otras dos transformaciones relativas, calculando el error del cierre de bucle mediante:

$$\varepsilon = (\xi_0^2 \oplus \xi_2^1) \ominus \xi_0^1 \quad (14)$$

En la Tabla 1 se muestran los errores obtenidos al evaluar los parámetros de calibración mediante el procedimiento descrito anteriormente. Si bien los tres métodos presentan errores similares, el método LM-R se ha empleado sin ninguna estimación inicial de los parámetros, mientras que en los otros dos métodos precisan una estimación inicial para descartar falsas correspondencias entre planos observados.

Tabla 1: Errores en el cierre de bucle tras estimar las transformaciones por parejas y medir su diferencia.

	τ_{err}	ω_{err}
FC	0.06 m	7.92°
LM	0.04 m	7.3°
LM-R	0.04 m	7.02°

6. Conclusiones

En este artículo se ha abordado el problema de la calibración extrínseca de un conjunto de cámaras RGB-D que forman un sólido rígido mediante el método de formulación cerrada propuesto en [7], un método basado en una solución iterativa y la extensión de este último con una formulación robusta en presencia de *outliers* y medidas altamente ruidosas.

Para ello se ha realizado un estudio comparativo de los errores cometidos por los tres métodos en un entorno simulado con condiciones cambiantes de niveles de ruido, número de observaciones, proporción de *outliers* en las observaciones y posiciones relativas de los sensores. Los experimentos muestran una mayor precisión de nuestra variante robusta del método iterativo en todos los escenarios analizados.

En un segundo experimento, los tres métodos han sido evaluados para una configuración de 3 cámaras RGB-D montadas en un robot real moviéndose en un entorno de oficina. En este experimento se han estimado las transformaciones relativas entre cada par de cámaras y se ha calculado el error existente entre una de las transformaciones estimadas y la obtenida al componer las otras dos. De igual forma, el método iterativo robusto ha demostrado obtener mejores resultados a la hora de estimar las transformaciones de las cámaras.

El código fuente de las librerías de C++ desarrolladas en este artículo ha sido publicado y podrá encontrarse en <http://mapir.uma.es>

Referencias

- [1] Arun, K. S., Huang, T. S., and Blostein, S. D. (1987). Least-squares fitting of two 3-D point sets. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, PAMI-9(5):698–700.
- [2] Blanco, J.-L. (2010). A tutorial on se (3) transformation parameterizations and on-manifold optimization. *University of Malaga, Tech. Rep.*
- [3] Brookshire, J. and Teller, S. (2013). Extrinsic Calibration from Per-Sensor Egomotion. In *Robotics: Science and Systems VIII*, pages 504–512. MIT Press.
- [4] Endres, F., Hess, J., Sturm, J., Cremers, D., and Burgard, W. (2014). 3-D mapping with an RGB-D camera. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(1):177–187.
- [5] Fankhauser, P., Bloesch, M., Rodriguez, D., Kaestner, R., Hutter, M., and Siegwart, R. (2015). Kinect v2 for mobile robot navigation: Evaluation and modeling. In *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*, pages 388–394. IEEE.
- [6] Fernández-Moral, E., Gonzalez-Jimenez, J., and Arévalo, V. (2015). Extrinsic Calibration of 2D Laser Rangefinders from Perpendicular Plane Observations. *International Journal of Robotics Research*, online.
- [7] Fernandez-Moral, E., Gonzalez-Jimenez, J., Rives, P., and Arevalo, V. (2014). Extrinsic calibration of a set of range cameras in 5 seconds without pattern. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 429–435. IEEE.
- [8] Gomez-Ojeda, R., Briaies, J., Fernandez-Moral, E., and Gonzalez-Jimenez, J. (2015). Extrinsic calibration of a 2d laser-rangefinder and a camera based on scene corners. In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 3611–3616. IEEE.
- [9] Gomez-Ojeda, R. and Gonzalez-Jimenez, J. (2016). Robust stereo visual odometry through a probabilistic combination of points and line segments. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2521–2526.
- [10] Ha, J.-E. (2012). Extrinsic calibration of a camera and laser range finder using a new calibration structure of a plane with a triangular hole. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 10(6):1240–1244.

- [11] Moré, J. J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In *Numerical analysis*, pages 105–116. Springer.
- [12] Moreno, F.-A., Blanco, J.-L., and González-Jiménez, J. (2013). ERODE: An efficient and robust outlier detector and its application to stereovisual odometry. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 4691–4697. IEEE.
- [13] Nex, F. and Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1):1–15.
- [14] Nguyen, C. V., Izadi, S., and Lovell, D. (2012). Modeling kinect sensor noise for improved 3d reconstruction and tracking. In *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2012 Second International Conference on*, pages 524–530. IEEE.
- [15] Schneider, S., Luettel, T., and Wuensche, H. J. (2013). Odometry-based online extrinsic sensor calibration. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1287–1292.
- [16] Sorkine, O. (2009). Least-squares rigid motion using SVD. *Technical notes*, 120(3):52.
- [17] Staranowicz, A., Brown, G. R., Morbidi, F., and Mariottini, G. L. (2014). *Easy-to-Use and Accurate Calibration of RGB-D Cameras from Spheres*, pages 265–278. Springer Berlin Heidelberg.
- [18] Svoboda, T., Martinec, D., and Pajdla, T. (2005). A convenient multicamera self-calibration for virtual environments. *PRESENCE: teleoperators and virtual environments*, 14(4):407–422.
- [19] Taylor, Z. and Nieto, J. (2015). Motion-based calibration of multimodal sensor arrays. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4843–4850.