



XLIV JORNADAS DE AUTOMÁTICA



Zaragoza
6-8 Septiembre 2023

Libro de Actas

Universidad de Zaragoza
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
6, 7 y 8 de septiembre
Zaragoza

XLIV JORNADAS DE AUTOMÁTICA : LIBRO DE ACTAS

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
6, 7 Y 8 DE SEPTIEMBRE DE 2023
ZARAGOZA

EDITAN:
Servizo de Publicacións. Universidade da Coruña, A Coruña
Comité Español de Automática, Barcelona
Universidad de Zaragoza, Zaragoza
2023



Universidad
Zaragoza

ORGANIZAN:

Comité Español de Automática
Universidad de Zaragoza

EDITORES:

José Manuel Andújar Márquez

Ramón Costa Castelló

Luis Montano Gella

Alejandro Mosteo Chagoyen

Vanesa Loureiro Vázquez

Pedro Jesús Cabrera Santana

Elisabet Estévez Estévez

Raúl Marín Prades

Eduardo Rocón de Lima

David Muñoz de la Peña Sequedo

Luis Payá Castelló

Manuel Gil Ortega

Óscar Reinoso García

Carlos Vilas Fernández

DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609>

ISBN: 978-84-9749-860-9

THEMA: TJFM, TJF

CDU: 681.05(063)



© de esta edición: UDC, CEA, UNIZAR

© de los textos: los autores

PREFACIO

El Comité Español de Automática (CEA) es una asociación científica sin ánimo de lucro que impulsa el desarrollo, la investigación y las enseñanzas universitarias en Automática. Es miembro nacional de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC), y celebra anualmente desde el año 1977 las Jornadas de Automática. Estas se organizan por distintas universidades o centros de investigación de habla hispana. El objetivo de las mismas es reunir a profesores, investigadores, estudiantes y profesionales del ámbito de la Automática para tratar temas vinculados con la docencia y la investigación (automatización y control, instrumentación, robótica, modelado y simulación de sistemas, visión por computador, ingeniería biomédica, inteligencia artificial, educación).

Las XLIV Jornadas de Automática se celebran de manera totalmente presencial en Zaragoza los días 6, 7 y 8 de septiembre de 2023. Hoy es ya la cuarta ciudad de España, con unos 700.000 habitantes, una gran actividad y oferta de turismo de ocio, de negocios, de congresos y reuniones, cultural y gastronómica. Tiene una historia que se aprecia en el contraste entre sus rincones históricos y su arquitectura moderna. La ubicación de Zaragoza es estratégicamente inmejorable y se encuentra perfectamente comunicada con las principales ciudades de España. Se trata de una ciudad altamente dinámica en muchos aspectos y en particular en la creación de empresas.

La Universidad de Zaragoza tiene su origen en un estudio de artes, creado por la Iglesia en el siglo XII, donde se enseñaban gramática y filosofía, y que concedía títulos de bachiller. En noviembre de 1582, Pedro Cerbuna, prior de la catedral de San Salvador de Zaragoza y más tarde obispo de Tarazona, aportó los medios económicos necesarios para abrir la nueva universidad, que se inauguró el 24 de mayo de 1583.

Las XLIV Jornadas de Automática tienen su sede en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) de la Universidad de Zaragoza, la universidad pública de Aragón. En la EINA se imparten diferentes grados y másteres relacionados con los ámbitos de la ingeniería y la arquitectura, y participa en diversos programas de doctorado. La presente edición está organizada por profesores e investigadores pertenecientes principalmente al Área de Ingeniería de Sistemas y Automática y al Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón. Cuenta con la participación de más de 250 asistentes.

El programa de esta edición desarrolla, como en ediciones anteriores, una variedad de actividades científico-técnicas, sociales y culturales. En el programa científico-técnico, las sesiones de los 9 Grupos Temáticos de

CEA están dedicadas a la discusión de las actividades de cada uno de ellos desarrolladas y a desarrollar en el futuro. Además, en esta edición en cada Grupo Temático se exponen oralmente comunicaciones seleccionadas entre los 154 trabajos aceptados para su publicación en las Actas y su exposición como pósteres durante todo el desarrollo de las Jornadas. Hay dos sesiones plenarias a cargo de dos investigadoras muy relevantes en el panorama internacional, una mesa redonda sobre financiación de la investigación, una sesión Industria 4.0 en la que se presentarán casos de éxito de colaboración empresa-universidad, y una sesión especial en colaboración con la sección española de la International Society of Automation (ISA). Asimismo, en los stands se desarrollan demostraciones de aplicaciones con robots y sistemas automáticos. En el evento se entregan premios a los mejores trabajos y tesis doctorales en el marco de trabajo de los Grupos Temáticos, el “Premio Nacional de Automática” (edición 2023) y el “Premio CEA al Joven Talento Femenino en Automática”. En esta edición se realiza un homenaje especial al fallecido Profesor Dr. Manuel Silva Suarez, persona de extraordinaria relevancia científica nacional e internacional y querido amigo.

También se realizan actividades culturales para dar a conocer mejor la ciudad, en su aspecto histórico, con visitas guiadas a los “2000 años de historias” y al Palacio de la Aljafería, y en su aspecto actual, con una visita guiada al Museo de la Movilidad en el Pabellón Puente.

El Comité Organizador quiere agradecer a los participantes las contribuciones al evento; a las empresas patrocinadores de los premios y actividades, a los comités de dirección, científico, a la Universidad de Zaragoza, y a las autoridades académicas, locales y de la Comunidad Autónoma de Aragón.

Queremos transmitir un agradecimiento especial al Servicio de Bibliotecas de la Universidade da Coruña (UDC), por el trabajo desarrollado para la edición de las Actas de las Jornadas. Se editan en formato electrónico y se alojan para su consulta en acceso abierto en el RUC, el repositorio institucional de la UDC, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0. Además del ISBN y del DOI del volumen completo, a cada comunicación aceptada se le ha asignado un DOI, con el fin de facilitar su localización en línea y su citación bibliográfica.

Luis Montano
Cristian Mahulea
José Luis Villarroel
Comité Organizador Local
1 de septiembre de 2023
Zaragoza

COMITÉS

Comité de Dirección

- José Manuel Andújar
- Ramón Costa
- Luis Montano

Comité Científico

- Coordinadores de Grupos Temáticos:
 - Raúl Marín (Automar)
 - Eduardo Rocón (Bioingeniería)
 - Pedro J. Cabrera (Control Inteligente)
 - David Muñoz (Educación en Automática)
 - Manuel Gil Ortega (Ingeniería de Control)
 - Carlos Vilas (Modelado, Simulación y Optimización)
 - Óscar Reinoso (Robótica)
 - Elisabet Estévez (Computadores y Control)
 - Luis Payá (Visión por Computador)

Comité Organizador Local

- **Presidente:** Luis Montano
- **Vicepresidente:** Cristian Mahulea
- **Secretario:** José Luis Villarroel
- Rosario Aragüés
- Jesús Bermúdez
- Ignacio Cuiral
- Eduardo Gil
- Gonzalo López-Nicolás
- Rubén Martínez-Cantín
- José María Martínez Montiel
- Eduardo Montijano
- Alejandro Mosteo
- Ana Cristina Murillo
- Edgar Ramírez
- Luis Riazuelo
- Antonio Romeo
- Carlos Sagüés
- Domenico Sicignano
- Danilo Tardioli

Colaboradores

- Tomás Berriel Martins
- Óscar León Barbed Pérez
- Cesar Borja Moreno
- Lorenzo Cano Andrés
- Sara Casao Martínez
- Samuel Adrián Cerezo
- Diego Martínez Baselga
- David Morilla Cabello
- Javier Morlana Ledesma
- Fernando Peña Bes
- Carlos Plou Izquierdo
- Pablo Pueyo Ramón
- Francisco Javier Sanz Bermejo
- Eloy Serrano Seco
- Clara Tomasin

ORGANIZADORES Y PATROCINADORES

Organizadores

Comité Español de Automática
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón
Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas
Universidad de Zaragoza

Patrocinadores de la Jornadas 2023

Cátedra BSH
Cátedra de Transformación Industrial-Gobierno de Aragón
Cátedra Mobility City-Fundación Ibercaja
Mathworks
Fundación CEA
CIRCE
Alimak
ITAINNOVA
PAL Robotics
ALECOP-SMC

Patrocinadores CEA

Robotnik
Siemens
CEA
IFAC-Spain
IDOM
Schneider Electric
IKERLAN
ISA
Springer
Prodel
iQua
OMRON
Ubotica
Universidade da Coruña

Tabla de contenidos

Automar

| | | |
|---|-------|----|
| Aprendizaje de trayectorias vía demostraciones para vehículo marino no tripulado / Yeyson Alejandro Becerra Mora, Víctor Quesada Conejero, Ángel Rodríguez Castaño and José Ángel Acosta | ..... | 1 |
| Tecnologías habilitadoras para automatizar la monitorización de blooms de cianobacterias / Eva Besada-Portas, José Luis Risco-Martín, Segundo Esteban, José María Girón-Sierra, Gonzalo Pajares and José Antonio López-Orozco | ..... | 6 |
| Diseño de formas aerodinámicas de las palas de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos: una primera aproximación / Jinane Radi, Abdelouahed Djebli, J. Enrique Sierra-Garcia and Matilde Santos | ..... | 12 |
| Improved underwater stereo reconstruction by turbidity characterization / Guillermo Venero Gómez, Carlos Torre Ferrero, José Ramón Llata García, José Joaquín Sainz, Elías Revestido Herrero and Francisco Jesús Velasco González | ..... | 17 |

Bioingeniería

| | | |
|--|-------|----|
| Comparación de dos principios de diseño de órtesis de tobillo no actuadas para asistir en la fase de propulsión: un estudio de caso / Cristina Bayón, Nikko Van Crey, Eduardo Rocon, Elliott Rouse and Edwin van Asseldonk | ..... | 23 |
| M3Rob: Robotic platform for wrist rehabilitation. Design aspects and control architecture. / Ana Ciscal, Gonzalo Alonso-Linaje, Juan Granja, Miguel Veganzones, Javier P. Turiel and Juan Carlos Fraile | ..... | 29 |
| Arquitectura funcional para una sutura robótica automatizada en cirugía laparoscópica / Álvaro Galán-Cuenca, Juan María Herrera-López, Marta Fernández-Naranjo, Isabel García-Morales, Alfredo Burrieza and Víctor Fernando Muñoz-Martínez | ..... | 35 |
| Modelado y control estocástico del crecimiento de células tumorales con quimioterapia usando MPC / Andrés Hernández-Rivera, Pablo Velarde, Ascensión Zafra-Cabeza and José M. Maestre | ..... | 41 |
| Pedaling Motor Imagery decodification through electroencefalographic signals / Javier V. Juan Poveda, Eduardo Iáñez, Mario Ortiz, Jesús Tornero López and José María Azorín | ..... | 47 |
| Estudio de selectividad frente a disoluciones multicomponente de sensores de glucosa mediante tecnología planar de microondas / Carlos Juan-Poveda, Enrique Bronchalo, Benjamin Potelon, Cedric Quendo, Víctor Fernando Muñoz-Martínez, Jose Manuel Ferrandez, Juliana Manrique-Cordoba and José María Sabater-Navarro | ..... | 53 |
| Cognitive Load measurement by using a concurrent multitasking simulation game / Blanca Larraga-García, Verónica Ruiz Bejerano and Álvaro Gutiérrez | ..... | 59 |
| Reducción de puntos de una trayectoria 3D basada en el algoritmo Douglas-Peucker. Aplicación a robótica quirúrgica / Juliana Manrique-Cordoba, Jesús Cases-Hurtado, Juan David Romero-Ante, Miguel Ángel De la Casa Lillo and José María Sabater-Navarro | ..... | 65 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Sistema inteligente para la evaluación de la función motora del miembro superior de pacientes con hemiparesia / Raul Martín Batanero, Yolanda Vales Gómez, José Vicente García Pérez, José María Catalán Orts, Luis Daniel Lledó Pérez and Nicolás García Aracil | ..... | 71 |
| Metodología de detección de anomalías en personas con esclerosis múltiple / Janire Otamendi, Asier Zubizarreta and Aitziber Mancisidor | ..... | 77 |
| EMG-Space Shooter: Integración de Sensor MindRove para Desarrollo de Serious Games Controlados por Activación Electromiográfica del Brazo / Edwin Daniel Oña Simbaña, Andrea Bandini, Silvestro Micera, Carlos Balaguer and Alberto Jardón Huete | ..... | 83 |
| Evaluation of a Test Dummy for Rehabilitation Platforms / Verónica Palomino Díaz, Pablo Romero-Sorozábal, Enrique Chacon Tanarro and Eduardo Rocon | ..... | 89 |
| Control strategy of a pseudo-stationary gait rehabilitation robot / Jaime Ramos, Eugenio Manuel Espuela, Julio Salvador Lora, Juan Alejandro Castaño, Susana Borromeo, Rubén Nieto, Pedro Fernández, Antonio José del Ama and Juan Carballeira | ..... | 95 |
| Detección de apneas en recién nacidos utilizando una IMU abdominal / Matteo Ricci, Jose Maria Vicente-Samper, Juan David Romero-Ante, Vicente Esteve-Sala, Nicolas Garcia-Aracil, Francesca Cordella and José María Sabater-Navarro | ..... | 99 |
| Generador de patrones de marcha tridimensionales dependientes de la altura y la velocidad / Pablo Romero-Sorozábal, Gabriel Delgado-Oleas, Álvaro Gutiérrez and Eduardo Rocon | ..... | 105 |
| Plataforma experimental para la obtención de las fuerzas de interacción en cirugía mínimamente invasiva / Iliana María Rumbo, Jesús Cases-Hurtado, Juliana Manrique-Cordoba, Juan David Romero-Ante, Carlos Martorell, Andres Vivas and José María Sabater-Navarro | ..... | 110 |
| Estudio de la variabilidad entre repeticiones del potencial de error respecto a P300 y N500 / Paula Soriano-Segura, Desiree Irene Gracia, Laura Ferrero, Eduardo Iáñez, Mario Ortiz and José María Azorín | ..... | 116 |
| Control Inteligente | | |
| Diseño de un Control de Velocidad mediante Redes Neuronales y Algoritmos Genéticos para Vehículos Autónomos / Javier Argente Mena, Matilde Santos and J. Enrique Sierra-García | ..... | 121 |
| Control longitudinal de un vehículo mediante aprendizaje por refuerzo profundo / Felipe Barreno Herrera, Matilde Santos and Manuel Romana | ..... | 127 |
| Desarrollo y simulación del subsistema de operación automático para trenes / Daniel Bilbao Moreno, Iker Elorza and Eloy Irigoyen | ..... | 132 |
| Dimensionado de intercambiadores de calor horizontales enterrados, para instalaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía. Un caso práctico. / Joaquín del Pino Fernández, Miguel Angel Martínez Bohorquez, José Manuel Andújar Márquez, Antonio Javier Barragán Piña, Arturo Aquino Martín and Juan Manuel Enrique Gómez | ..... | 138 |
| Fault detection in floating wind turbines using neural networks. / Ignacio Galeote, Giordy Alexander Andrade, Segundo Esteban and Matilde Santos | ..... | 144 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Development of a digital twin: evaluation of industrial softwares and methodology / Pablo González, Javier Gómez, Juan Gómez-Jiménez, John Kevin Parra and Juan Manuel Escaño | ..... | 150 |
| MPC with fuzzy modelling for energy management in a manufacturing plant / Javier Gómez, William D. Chicaiza Salazar, Juan Manuel Escaño and Carlos Bordons | ..... | 156 |
| Estudio del comportamiento de modelos neuronales de sistemas MIMO acoplados / Lucía Iturbe, Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, Vicente Gómez-Garay and Javier Sanchis | ..... | 162 |
| Extensión del algoritmo de codificación-decodificación basado en PWM para Redes Neuronales de Impulsos / Sergio Lucas, Eva Portillo Pérez, Léo Guérin and Itziar Cabanes Axpe | ..... | 168 |
| Control inteligente para optimizar la extracción de potencia y reducir vibraciones en sistemas eólicos offshore / Eduardo Muñoz-Palomeque, J. Enrique Sierra-García and Matilde Santos | ..... | 174 |
| Fuzzy system for supporting the velocity envelope of an aircraft / Elías Plaza, Matilde Santos and J. Enrique Sierra-García | ..... | 180 |
| Modelado integrado de fuerzas y motores de inducción en el proceso de fresado / Ignacio Trojaola, Iker Elorza and Estela Nieto | ..... | 186 |
| Diseño basado en modelos de la estrategia iMO-NMPC: Implementación en dispositivos industriales / Asier Zabaljauregi, Mikel Larrea, Eloy Irigoyen and Fernando Artaza | ..... | 192 |

Educación en Automática

| | | |
|--|-------|-----|
| Análisis de un robot abierto de bajo coste para docencia de aprendizaje automático / Jorge Bes Carreras, Javier García Barcos and Ruben Martínez-Cantín | ..... | 198 |
| Experiencia multidisciplinar para introducir los ODS en automática / Isidro Calvo, Edorta Carrascal, Jose Manuel González, Jose Miguel Gil-García, Xabier Basogain Olabe, César Escudero-Revilla, Angel J. García-Adeva and Oscar Barambones | ..... | 204 |
| Simulador on-line de turbinas eólicas mediante OpenFAST / Manuel Cazalla, Juan Garrido, Manuel Lara, Francisco Vazquez and Mario L. Ruz | ..... | 210 |
| Nuevas ideas para enseñar ingeniería a través de prácticas de laboratorio: una metodología en tres fases. / Daniela Alejandra Goncalves López de Medrano, Jesús Chacón, Lía García, José Antonio López-Orozco and Eva Besada-Portas | ..... | 215 |
| Nuevos laboratorios virtuales para aplicaciones de control / Antonio Gonzalez Sorribes and Leopoldo Armesto | ..... | 221 |
| Gemelo digital de una célula electro-neumática robotizada / Raúl González-Herbón, Guzmán González-Mateos, José Ramón Rodríguez-Ossorio, Serafín Alonso, Juan José Fuertes and Manuel Domínguez | ..... | 225 |
| Integración Basada en Estándares de un Laboratorio Remoto en una Plataforma de Gestión de Aprendizaje / Eduardo Lucena, Ildefonso Ruano, Elisabet Estévez, Juan Gómez Ortega and Javier Gámez García | ..... | 231 |
| Competición de Robótica Submarina Máster MIR: Experiencia Educativa / Salvador López Barajas, Sergio Fornas, Alejandro Solís, Raul Marín Prades, Ricard Marxer, Vincent Hüge and Pedro J. Sanz | ..... | 237 |
| Aprendizaje basado en proyecto: montaje de un panel domótico / José María Manzano | ..... | 241 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Aprendizaje en el ámbito de la Introducción a la Robótica Móvil: Experiencia en la Competición ASTI Robotics Challenge / Raúl Marín Prades, Josep Marqués Verdegel, Josep Marín Garcés, Miguel De Diego Pérez, Alvaro Arbona Rodríguez, Jairo Muñoz García, Edgar Rogalsky, Pau Monteagut Bofi, José Vicente Martí Aviles, Antonio Morales Escrig, Enric Cervera Mateu and Pedro J. Sanz | ..... | 247 |
| Percepción del alumnado sobre la perspectiva de género en las asignaturas de la rama Electrónica / Oscar Miguel-Escrig, Jorge Segarra-Tamarit and Julio-Ariel Romero-Pérez | ..... | 253 |
| Plataforma giroscópica mejorada para la práctica docente en Ingeniería de control / Silvano Nájera, Francisco Alejandro Zambrano, Ramón Rico, Javier Rico-Azagra and Montserrat Gil-Martínez | ..... | 259 |
| Enseñando diseño electrónico y control avanzado con un levitador magnético / Édgar Ramírez Laboreo, Antonio Bono Nuez, Eduardo Montijano Muñoz and Carlos Sagüés Blázquez | ..... | 265 |
| Creación de ejercicios con corrección automática con MATLAB Grader para asignaturas de control automático / Inés Tejado, Cristina Nuevo-Gallardo and Emiliano Pérez | ..... | 271 |
| Método para la mejora de la comprensión basado en el aprendizaje activo. Un caso de estudio en la ingeniería de control. / Sergio Velázquez-Medina and Pedro Cabrera-Santana | ..... | 277 |

Ingeniería de control

| | | |
|--|-------|-----|
| Modelado y control de la potencia frigorífica de una máquina de absorción / Luis Fernando Acedo, Manuel Garrido Satue, Francisco Rodríguez Rubio and Manuel Gil Ortega Linares | ..... | 283 |
| Control del circuito de refrigeración en instalaciones de destilación por membranas / Alejandro Bueso, Juan Diego Gil Vergel, Isabel Requena, Lidia Roca, José Liria García and Manuel Berenguel | ..... | 289 |
| Estimación de la producción de microalgas en fotobiorreactores industriales / Emma Delgado, Enrique Rodríguez, Alfonso Baños, Antonio Barreiro, José Carlos Moreno and José Luis Guzmán | ..... | 295 |
| Reparto frecuencial de la realimentación en estructuras en cascada: aplicación al control robusto de un servomotor / Montserrat Gil-Martínez, Javier Rico-Azagra and Silvano Nájera | ..... | 300 |
| Implementing rover speed control in Paparazzi UAV / Alfredo Gonzalez-Calvin, Juan Francisco Jimenez and Lía García-Pérez | ..... | 306 |
| Sensibilidad del Predictor de Smith respecto de pequeñas desviaciones en la identificación del retardo: un enfoque gráfico / Andrés Gonzalo and Antonio Romeo | ..... | 311 |
| Búsqueda de equilibrios de Nash en juegos poblacionales bajo información parcial y su aplicación en juegos de congestión / Juan Martínez-Piazuelo, Carlos Ocampo-Martínez and Nicanor Quijano | ..... | 317 |
| A model independent constrained predictive control for the Furuta pendulum / Blanca Martínez, Javier Sanchis and Sergio García-Nieto | ..... | 323 |
| Análisis de la frecuencia de muestreo en sistemas multi-robot / Francisco José Mañas Álvarez, María Guinaldo, Raquel Dormido and Sebastián Dormido | ..... | 329 |
| Controlador Híbrido para un Fotobiorreactor Industrial Raceway / Juan Ignacio Mulero Martínez, Alfonso Baños, José Carlos Moreno Úbeda and José Luis Guzmán Sánchez | ..... | 335 |

| | | |
|---|-------|-----|
| Control óptimo basado en un controlador cuadrático lineal con acción de control por adelantado para hornos solares / Igor Pataro, Juan Diego Gil Vergel, José Luis Guzmán, João M. Lemos and Manuel Berenguel | ..... | 340 |
| Predicción de demanda y generación renovable con Deep Learning: Aplicación a la optimización de estaciones de carga de vehículos eléctricos / Francisco Ramos-Pérez, Carlos Vivas and Francisco R. Rubio | ..... | 346 |
| Control robusto de la actitud de un multirroto empleando una arquitectura de control en cascada con prealimentación / Javier Rico-Azagra and Montserrat Gil-Martínez | ..... | 352 |
| Gestión de energía, mediante control predictivo, de un vehículo de pila de combustible / Álvaro Ruiz Sicilia, Bryan Escachx Estévez and Ramon Costa-Castelló | ..... | 358 |
| Control adaptativo ciclo a ciclo de relés electromecánicos / Eloy Serrano Seco, Eduardo Moya Lasheras and Édgar Ramírez Laboreo | ..... | 364 |
| Gestión de energía en comunidades energéticas mediante Blockchain y MPC estocástico y distribuido / Manuel Sivianes, Pablo Velarde, Ascensión Zafra-Cabeza and Carlos Bordons | ..... | 370 |
| Diseño óptimo de actuadores y sensores para sistemas lineales mediante algoritmos genéticos / Alejandro Tapia and Luis Orihuela Espina | ..... | 376 |
| Modelado, Simulación y Optimización | | |
| Desarrollo de modelos de predicción de radiación solar mediante técnicas de machine learning / Verónica Abad Alcaraz, María del Mar Castilla Nieto, José Domingo Álvarez Hervás, José Antonio Carballo López and Javier Bonilla | ..... | 382 |
| Caracterización térmica de un intercambiador de calor de un autobús / María Luisa Delgado Guerrero, Jorge Jiménez and Francisco Vazquez | ..... | 388 |
| Fluid simulation methods applied to lakes and reservoirs. / Samuel Ferrero Losada, José Antonio López Orozco, Eva Besada-Portas, Gonzalo Carazo Barbero and José Luis Risco-Martín | ..... | 393 |
| Use of 1D convolutional network in spectrometry for classification of microalgae strains / José González Hernández, José Luis Guzmán Sánchez, Gabriel Acien, Martina Ciardi and José Carlos Moreno Úbeda | ..... | 399 |
| Simulación dinámica distribuida con adición de eventos / Fernando Gutiérrez Rodríguez, Rogelio Mazaeda Echevarría and Jesús María Zamarreño Cosme | ..... | 405 |
| Evaluación térmica de un captador cilindroparabólico de pequeña apertura / Marta Leal Rueda, José Domingo Álvarez Hervás, María del Mar Castilla Nieto, José L. Torres and Manuel Pérez García | ..... | 411 |
| Asignación estacionaria de consignas óptimas en parques eólicos / Samuel Martínez-Gutiérrez, Daniel Sarabia and Alejandro Merino | ..... | 417 |
| Modelado matemático de heterorresistencia en poblaciones bacterianas sometidas a estrés antimicrobiano / Nerea Martínez-López, Adrián Pedreira, Carlos Vilas and Míriam R. García | ..... | 423 |
| Modelado y simulación de la inactivación de patógenos con higienizantes en un tanque de lavado de alimentos operado en continuo y con flujo turbulento / Ari Salvador Moreno Razo, Nerea Martínez López and Míriam R. García | ..... | 429 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Combinación de modelos basados en mecanismos y basados en datos para la predicción de la evolución de calidad en pescado fresco / Miguel Novoa, Míriam R. García, Silvia Muñoz, Juan R. Herrera, Marta López-Cabo and Carlos Vilas | ..... | 435 |
| Primera aproximación al modelado y control de tráfico / Miguel Ortiz, Matilde Santos and Romana Manuel | ..... | 441 |
| Optimización experimental con presupuesto finito combinando heurísticas Bayesianas en un POMDP / José Luis Pitarch, Leopoldo Armesto, Antonio Sala and Daniel Montes | ..... | 447 |
| Towards automation of the Design-Build-Test-Learn (DBTL) bioengineering cycle: Application to the testing and characterization of standard bioparts. / Anna Pushkareva, Jaime Beltrán, Harold Díaz Iza, Andrés Arboleda-García, Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó | ..... | 453 |
| Entorno de simulación de vehículos no tripulados y sensores marinos / Víctor Quesada Conejero, Jesús Capitán Fernández and Ángel Rodríguez Castaño | ..... | 459 |
| Simulación y control de robots en aplicaciones de servicio en órbita mediante OnOrbitROS / José L. Ramón, Jorge Pomares and Leonard Felicetti | ..... | 465 |
| Regresión de la Cinemática de un Brazo Robótico Blando mediante Procesos Gaussianos Aproximados / Carlos Relaño, Javier Muñoz and Concepción A. Monje | ..... | 471 |
| Operación óptima de un sistema de refrigeración combinada / Juan Miguel Serrano Rodríguez, Juan Diego Gil Vergel, Javier Bonilla, Patricia Palenzuela and Lidia Roca | ..... | 477 |
| Modelo dinámico y simulación de sistemas de ósmosis inversa / Daniel Jesús Suárez Alfonso, Alejandro Ruiz García and Ignacio Agustín De La Nuez Pestana | ..... | 483 |
| Diseño óptimo de redes de riego / Alejandro Tapia and José María Manzano | ..... | 489 |
| Uso de algoritmo genético para gestionar la demanda energética en microrredes mediante descomposición poligonal / Alex O. Topa, Nicolás Calvo, José D. Álvarez and José L. Torres | ..... | 495 |
| Robótica | | |
| Integración en robot social Mini del juego "Veo, veo" / Guillermo Arrojo, Jesus Garcia, Juan Borrero, Jose Carlos Castillo, Álvaro Castro-González and Miguel Ángel Salichs | ..... | 501 |
| Estimación de carga sobre un actuador SMA para rehabilitación / Carmen Ballester, Víctor Muñoz Sánchez and Dolores Blanco Rojas | ..... | 507 |
| Diseño de un actuador híbrido para rehabilitación acuática / Elías Belmonte Cerdán, José Vicente García Pérez, David Martínez Pascual, Jesús Álvarez Pastor, Andrea Blanco Ivorra and Nicolás García Aracil | ..... | 512 |
| Estimación Algebraica Robusta en Tiempo Real de la Frecuencia Natural y el Retardo de un Robot Flexible Teleoperado / Salma Benftima, Saddam Gharab, María Isabel Haro-Olmo, Luis Mérida-Calvo and Vicente Feliu Batlle | ..... | 517 |
| Control de un robot Niryo desde Matlab y Simulink / Alicia Beneyto Rodríguez and Alberto Herreros López | ..... | 523 |
| MOLDAM additive manufacturing robotic cell for extruding thermoplastic pellets / Pablo Bengoa Ganado, Juan Carlos Antolín Urbaneja, Itzel de Jesus Gonzalez Ojeda, Juan Antonio Ortega Lamolda, Unai Martinez and Christos Gkournelos | ..... | 528 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Sensor táctil intrínseco para caracterizar la firmeza de superficies con robots programados en modo control de fuerza / Carlos Blanes, Miguel López and Eugenio Ivorra | ..... | 533 |
| Implementación del juego pares o nones en un robot social / Juan Borrero, Guillermo Arrojo, Jesús García, Jose Carlos Castillo, Álvaro Castro-González and Miguel Ángel Salichs | ..... | 539 |
| La suerte del principiante: aplicando estrategias psicológicas para incrementar la interacción humano-robot / Sara Carrasco Martínez, Marcos Maroto Gómez, Fernando Alonso Martin, Juan José Gamboa Montero and Miguel Ángel Salichs | ..... | 545 |
| Predicción de deslizamiento mediante la segmentación de imágenes táctiles / Julio Castaño and Pablo Gil | ..... | 551 |
| Trajectory generation for autonomous vehicles in urban environments / Carlos Castellanos-Ormeño, David Yagüe-Cuevas, Pablo Marín-Plaza and José María Armingol Moreno | ..... | 557 |
| Sistema de realidad virtual para teleoperación de robots tipo centauro / Christyan Cruz, Jorge Juez, Jaime del Cerro and Antonio Barrientos | ..... | 563 |
| Un prototipo de robot mascota para interacción con ancianos / Andrea de la Cruz, Carmen Maria Cabezaolías, Marcos Maroto Gómez, Jose Carlos Castillo and Miguel Ángel Salichs | ..... | 569 |
| Estimating conversational groups using 3D cameras and machine learning for its application to social robotics / Diego Delgado Chaves, Jose Ángel Praena Rodríguez, Fernando Caballero, Randy Gomez and Luis Merino | ..... | 575 |
| Planificación de trayectorias en robots redundantes con mapas de factibilidad y RRT / Marc Fabregat-Jaen, Adrián Peidró Vidal, Francisco Jose Soler, Arturo Gil and Óscar Reinoso | ..... | 581 |
| Predicción de gestos no-verbales usando aprendizaje profundo / Enrique Fernández Rodicio, Christian Dondrup, Javier Sevilla-Salcedo, Álvaro Castro-González, Maria Malfaz and Miguel Ángel Salichs | ..... | 587 |
| Aplicaciones de una garra robótica adaptativa con dedos rotativos / Rubén Garralón-López, Sebastián Acebal-Collí, Francisco Jesús Ruiz-Ruiz, Jesús Manuel Gómez-de-Gabriel and Juan Antonio Fernández-Madrigal | ..... | 593 |
| Online 3D LIDAR-based mapping for long-range powerline inspection using UAVs / Iván Gutiérrez Rodríguez, Javier Luna-Santamaría, Julio Lopez Paneque, J. Ramiro Martínez-de Dios and Aníbal Ollero | ..... | 599 |
| Modelado de un sistema háptico móvil basado en antenas flexibles / María Isabel Haro-Olmo, Luis Mérida-Calvo, Salma Benftima, Saddam Gharab and Vicente Feliu Batlle | ..... | 605 |
| ROS2 gesture classification pipeline towards gamified neuro-rehabilitation therapy / Sofia Hernández Pérez, Ignacio Montesino Valle, Juan González Victores, Edwin Daniel Oña Simbaña and Alberto Jardón Huete | ..... | 611 |
| ExoEpi: exoesqueleto de tobillo para asistencia de personal de emergencias / Manuel Herraiz-Sala, Clemente Fernández-Irles, David Martínez-Pascual, Andrea Blanco Ivorra, Francisca Aran Ais and Nicolas Garcia-Aracil | ..... | 617 |
| Diseño y prototipado de una plantilla sensorizada para la monitorización de la pisada / Pilar Isabel Maldonado Muñoz, Juan Miguel Garcia-Haro, Maria Antonia Simon, Ana-I Velasco-Fernandez and Eva Bernardos | ..... | 622 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Diseño, fabricación y control de un prototipo de robot autónomo con flagelo / Enrique Mancha-Sánchez, Andrés J. Serrano-Balbontín, Inés Tejado and Blas M. Vinagre | ..... | 627 |
| Path planning with far-away obstacles detection under uncertainty / Laura Mantoani, Carlos Perez-Del-Pulgar and Gabriel Luque Polo | ..... | 633 |
| Estímulos, pulsiones y ritmos biológicos como estrategias motivadoras del comportamiento de robots autónomos / Marcos Maroto Gómez, Sara Carrasco Martínez, María Malfaz, Álvaro Castro-González and Miguel Ángel Salichs | ..... | 639 |
| Robot mascota con carácter social y emocional para interacción multimodal en aplicaciones de compañía y entretenimiento / Marcos Maroto Gómez, Matthew Lewis, María Malfaz, Álvaro Castro-González, Miguel Ángel Salichs and Lola Cañamero | ..... | 645 |
| Estudio de una estructura de tipo origami como eslabón blando / Lisbeth Karina Mena López, Jorge Muñoz Yañez-Barnuevo, Concepción A. Monje, Santiago Martínez de la Casa and Carlos Balaguer | ..... | 650 |
| Extracción de modelos 3D basado en CNN y nubes de puntos para mapeado / Alberto Mendez, Alicia Mora and Ramon Barber | ..... | 655 |
| Sistema de interacción humano-robot basado en la mirada para la manipulación de objetos / Elisabeth Menéndez, Juan Hernandez Vicen, Santiago Martínez de la Casa, Concepción A. Monje and Carlos Balaguer | ..... | 661 |
| State of the Art in Robot Fleet Management: From Task Allocation to Motion Planning / Andrés Meseguer and Francisco Blanes | ..... | 667 |
| Modelo virtual de una plataforma de movilidad ortesis-silla para entornos domésticos / Joaquim Minguella-Canela, Eider Iturbe, Luis Miguel Muñoz-Morgado and Alicia Casals | ..... | 673 |
| Simultaneous trajectory and contact planning of a walking robot / Paula Mollá Santamaría, Adrián Peidro Vidal, Luis Payá, Mónica Ballesta and Óscar Reinoso | ..... | 679 |
| Diseño de un robot para envolver pastillas de jabón / Elisa Marcos Delgado, Eduardo Moya de la Torre and Alberto Herreros López | ..... | 685 |
| CollisionGP: comprobación de colisiones probabilística con procesos gaussianos / Javier Muñoz and Luis Moreno | ..... | 691 |
| A new approach for direct kinematic solution of a soft robotic neck. / Luis Nagua, Concepción A. Monje, Nicole Continelli and Carlos Balaguer | ..... | 697 |
| HuNavSim: simulador de navegación humana para evaluación de navegación social / Roberto Otero, Noé Pérez-Higueras, Fernando Caballero and Luis Merino | ..... | 702 |
| Resolución geométrica de la cinemática inversa de un robot sin muñeca esférica / Leopold Palomo-Avellaneda, Jan Rosell, Raul Suarez and Isiah Zaplana | ..... | 708 |
| Visual human tracking applied to non-anthropomorphic manipulators for imitation / Adrián Prados, Blanca López, Ramón Barber and Luis Moreno | ..... | 714 |
| Desarrollo de un HMI en ROS-MATLAB para la teleoperación de robots industriales / Natalia Prieto-Fernández, Martín Bayón Gutiérrez, Sergio Fernández-Blanco, Álvaro Fernández-Blanco, Francisco Carro-De-Lorenzo and José Alberto Benítez-Andrades | ..... | 720 |
| Celda para actuador de ventilación e iluminación natural para fachadas de edificios inteligentes / Francisco San Martín-Guardeño, David Padiá-Allué and Ricardo Vázquez-Martín | ..... | 726 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Estimación de zonas transitables en nubes de puntos 3D con redes convolucionales dispersas. / Antonio Santo, Arturo Gil, David Valiente, Mónica Ballesta and Óscar Reinoso | ..... | 732 |
| Evolution of robot controllers for solving multiple tasks sequentially / Rafael Sendra-Arranz and Álvaro Gutiérrez | ..... | 738 |
| Actuador hidráulico blando para navegación de catéteres: Diseño, simulación y fabricación de primeros prototipos / Andrés J. Serrano-Balbontín, Enrique Mancha-Sánchez, Inés Tejado and Blas M. Vinagre | ..... | 744 |
| Análisis comparativo de técnicas de segmentación de estructuras reticulares / Francisco Jose Soler, Adrián Peidro Vidal, Marc Fabregat-Jaén, Luis Payá and Óscar Reinoso | ..... | 750 |
| Benchmarking the LiCAS dual arm teleoperation system for aerial and ground service robotic applications / Alejandro Suarez and Aníbal Ollero | ..... | 756 |
| Innovación en la industria juguetera: sistema robótico para el desmoldeo / Daniel Sánchez, Carlos A. Jara and Francisco Gomez-Donoso | ..... | 762 |
| Control híbrido para la manipulación robótica de elementos flexibles / Benjamín Tapia Sal Paz, Gorca Sorrosal, Aitziber Mancisidor and Itziar Cabanes Axpe | ..... | 768 |
| Robot nadador con flagelo flexible basado en actuación única: Prueba de propulsión en condiciones de bajo número de Reynolds / Inés Tejado, José Antonio Rebollo-Gómez Coronado, Cristina Nuevo-Gallardo and Blas M. Vinagre | ..... | 773 |
| Computación frontera: influencia de latencias en la precisión de robots / Dominik Urbaniak, Jan Rosell, Raul Suarez and Michael Suppa | ..... | 779 |
| A generic controller for teleoperation on robotic manipulators using low-cost devices / Bartek Lukawski, Juan G. Victores and Carlos Balaguer | ..... | 785 |

Computadores y Control

| | | |
|---|-------|-----|
| Development of components for microservice based applications / Julen Cuadra, Ekaitz Hurtado, Alejandro López, Elisabet Estévez, Oskar Casquero and Aintzane Armentia | ..... | 789 |
| Control de acceso remoto a redes industriales / Miguel Díaz-Cacho Medina, Andre Chaves Méndes and Alejandro Pereira | ..... | 795 |
| Modelo Digital para Definir y Emular Automatismos Secuenciales / Sergio Illana, Alejandro Sánchez García, Elisabet Estévez, Juan Gómez Ortega and Javier Gámez García | ..... | 801 |
| Entorno PIL para la validación de controladores de turbinas eólicas basados en IEC-61131 / Alberto Martínez, J. Enrique Sierra-García, Matilde Santos and Lorenzo Leija | ..... | 807 |
| Particionado del software de control de un prototipo de vehículo autónomo / Luis Ortiz Enguix, Yolanda Valiente Moreno, Patricia Balbastre Betoret, José Enrique Simó Ten and Alfons Crespo Lorente | ..... | 813 |
| Modelado, simulación y control remoto de robot de 2GL en redes 5G / Mario Peñacoba, J. Enrique Sierra-García, Matilde Santos and Lorenzo Leija | ..... | 819 |
| Aplicación para el estudio de medida de distancias mediante UWB / Antonio Ruiz, Juan Garrido, Francisco Vazquez and Mario L. Ruz | ..... | 825 |

Gemelo Funcional para pruebas del software de sistemas de producción automatizados / María Luz Álvarez, Isabel Sarachaga, Arantazu Burgos and Nagore Iriondo 831

Visión por computador

Análisis visual de escenas en entornos submarinos / César Borja and Ana Cristina Murillo 837

Detección de aeronaves en trayectoria de colisión de vuelo mediante optical flow / Juan José Cabrera Mora, Arturo Gil, Luis Payá, Óscar Reinoso and David Rodríguez 843

Automatic classification of pores in aluminum castings using machine learning / Deisy Chaves, Eduardo Fidalgo Fernandez, Pablo Rodríguez-González, Ana Isabel Fernández-Abia, Enrique Alegre and Joaquín Barreiro 849

Detección de anomalías urbanas basada en visión por ordenador e IA - gestión de residuos / Victoria Frutos, Borja Pérez, Sergio Campos, Alejandro Barrera, Oscar García, Fernando García and Abdulla Al-Kaff 855

Calculo de flujo óptico denso en colonoscopia mediante aprendizaje no supervisado / Ivan Gonzalo, Javier Morlana and Jose M M Montiel 861

Un método para la calibración de un sistema LiDAR y cámara fisheye / Álvaro Martínez Ballester, María Flores Tenza, Luis Payá, Arturo Gil Aparicio and Luis Miguel Jimenez Garcia 867

Implementación de una red neuronal para la detección de anomalías en bandejas / Julián Sánchez Santalices, Eduardo Moya de la Torre and Alfonso Poncela Méndez 873

Simulador inmersivo de visión protésica modelando estímulos espacio-temporales / Maria Santos-Villafranca, Julia Tomas-Barba, Alejandro Perez-Yus, Jesus Bermudez-Cameo and Jose J. Guerrero 879

Localization and anomaly detection using images in a Bayesian framework / Giulia Slavic, Pablo Marín-Plaza, Lucio Marcenaro, David Martín Gómez and Carlo Regazzoni 885

Semantic image segmentation for autonomous vehicle navigation in structured environments / Pascual Tornero Martín, David Yagüe-Cuevas, José María Armingol Moreno and Arturo de la Escalera Hueso 891

Un método para la calibración de un sistema LiDAR y cámara fisheye

A. Martínez*, M. Flores, L. Payá, A. Gil, L. M. Jiménez

*Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche (I3E)
Universidad Miguel Hernández de Elche
Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), España.*

To cite this article: Martínez, A., Flores, M., Payá, L., Gil, A. Jiménez, L.M. 2023. Method for LiDAR and fisheye camera calibration. XLIV Jornadas de Automática, 867-896. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.867>

Resumen

El uso de sistemas de percepción que combinan sensores LiDAR y cámaras se está haciendo cada vez más frecuente, pues la fusión de sus datos proporciona una ayuda para la percepción del entorno. Además, las tareas de detección de objetos o la segmentación semántica del entorno precisan, frecuentemente, la combinación de sensores de diferente naturaleza con el objetivo de mejorar sus resultados. La calibración de estos sistemas es un paso fundamental para la correcta fusión de los datos. En este artículo se propone un método de calibración basado en un patrón para este tipo de sistemas, formados por una cámara *fisheye* y un LiDAR. El método evita transformar las imágenes a un modelo *pin-hole*, realizando una calibración a partir de la proyección esférica de la imagen, obtenida mediante los parámetros de calibración y la nube de puntos correspondiente.

Palabras clave: Sistemas multisensoriales, Fusión de información, Sistemas robóticos autónomos, LiDAR, Fisheye, Calibración.

A Method for LiDAR and fisheye camera system calibration

Abstract

The usage of LiDAR and camera systems is increasing rapidly, since the fusion of their information may provide a better understanding of the environment. In particular, the correct fusion of the data provided by both sensor types allows to improve the results in terms of object detection or semantic segmentation. The calibration of these systems is crucial for the correct fusion of data. This article proposes a target-based calibration method for such systems, formed by a LiDAR and a fisheye camera. The method avoids transforming the images to a pin-hole camera model, performing a calibration based on the spherical projection of the image, obtained with the calibration parameters and the corresponding point cloud.

Keywords: Multi sensor systems, Information and sensor fusion, Autonomous robotic systems, LiDAR, Fisheye, Calibration.

1. Introducción

En el campo de la navegación autónoma, la combinación de cámaras y LiDAR es fundamental para mejorar la percepción del entorno y la toma de decisiones. Los sensores LiDAR proporcionan medidas precisas de distancia y son invariantes a las condiciones lumínicas, mientras que las cámaras proporcionan información visual detallada del entorno. Juntos, estos sistemas permiten una representación más completa y precisa del entorno circundante, lo que es esencial para garantizar la

seguridad y eficiencia en la navegación autónoma.

La combinación de datos de sistemas LiDAR y cámara mejora la percepción del entorno en aplicaciones como la segmentación semántica de nubes de puntos e imágenes, que facilita la identificación y clasificación de objetos y superficies en escenas tridimensionales. Además, la fusión de información tridimensional y visual permite una detección de objetos más precisa en tiempo real. Algunos de los trabajos desarrollados en los últimos años para la segmentación semántica de nubes de puntos y reconocimiento de objetos demuestran que el diseño acertado

*Autor para correspondencia: alvaro.martinezb@umh.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

de métodos que fusionen la información correctamente aporta claras mejoras respecto a métodos basados en un único sensor (Pang et al., 2020; Zhao et al., 2021; Li et al., 2022; Abdelkader and Moustafa, 2023).

La calibración precisa de sistemas combinados de cámara y LiDAR es clave para una interpretación precisa y en tiempo real del entorno. Aunque los métodos para la calibración de sistemas de LiDAR y cámaras *pin-hole* son abundantes, este artículo se centra en la calibración de cámaras *fish-eye*, que aportan un campo de visión más amplio. La mayoría de los métodos de calibración en la literatura no son aplicables al problema propuesto, ya que están orientados a la calibración de cámaras de tipo *pin-hole*.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en el Apartado 2 se presentan algunos trabajos estrechamente relacionados con el método propuesto en este artículo. Seguidamente, en el Apartado 3 se describe el método diseñado de manera detallada. Mientras que en el Apartado 4 se detalla el diseño de los experimentos, en el 5 se muestran los resultados de los experimentos con el método desarrollado. Por último, se extraen las conclusiones en el Apartado 6.

2. Estado del Arte

La calibración entre sistemas de cámara y LiDAR es esencial para garantizar una percepción precisa y fiable del entorno en aplicaciones de navegación autónoma y robótica. Así pues, nos referimos a métodos que permiten obtener:

- Los parámetros de calibración intrínsecos de la cámara *fish-eye* que permiten realizar la proyección de los puntos (en el sistema de coordenadas de cámara) a una imagen.
- La matriz de transformación relativa T entre los sistemas de coordenadas de cámara y LiDAR.

La primera parte se considera conocida, pues existe una infinidad de métodos para realizar esta calibración (Zhang, 2000; Zhiyi and Tang, 2016). El método propuesto se centra en la segunda parte, de manera que permite obtener la relación tridimensional entre dichos sensores, que es el fin último de realizar la calibración. En el estado del arte, los métodos de calibración se pueden clasificar en dos categorías principales: métodos basados en un patrón (*target* o *target-based*) y métodos que no utilizan ningún patrón (*targetless*).

2.1. Targetless

Los métodos *targetless* no requieren un objeto de calibración específico, sino que utilizan características naturales del entorno (esquinas o bordes) para establecer la relación entre los sistemas de cámara y LiDAR. Estos métodos son más flexibles y convenientes que los métodos basados en un *target*, pero pueden ser menos precisos en algunas situaciones.

Los métodos de calibración *targetless* para sistemas LiDAR-cámara se pueden clasificar en tres categorías principales: basados en movimiento, basados en aprendizaje profundo y tradicionales (basados en características de imágenes y LiDAR).

2.1.1. Basados en el Movimiento

Estos enfoques aprovechan el movimiento del sistema cámara-LiDAR para estimar la transformación entre ambos sistemas. Se utilizan algoritmos de optimización para estimar la transformación que explica mejor las observaciones en ambos sistemas. Por ejemplo, en (Ishikawa et al., 2018), se utiliza ICP para estimar el movimiento en el LiDAR mediante el uso de RANSAC (Fischler and Bolles, 1981) y el algoritmo de los cinco puntos. Por otra parte, en (Nistér et al., 2006), se estima el movimiento de la cámara entre dos frames, haciendo uso de descriptores obtenidos con el algoritmo de AKAZE (Fernández Alcantarilla, 2013) calculados sobre la nube de puntos.

2.1.2. Aprendizaje Profundo

Estos enfoques emplean redes neuronales profundas para aprender la correspondencia entre las características de las imágenes y las nubes de puntos LiDAR. Algunos métodos que emplean aprendizaje profundo para la calibración de LiDAR y cámara son (Schneider et al., 2017), (Iyer et al., 2018) y (Lv et al., 2021). El aprendizaje profundo ha demostrado ser eficaz en la calibración de sistemas LiDAR-cámara, especialmente en entornos complejos y desafiantes.

2.1.3. Tradicionales

Estos enfoques extraen características de las imágenes y las nubes de puntos, como características del entorno (esquinas, bordes, superficies planas), y características intrínsecas de la cámara y el LiDAR (escala de grises y la reflectividad respectivamente), y establecen correspondencias entre ellas. Luego, utilizan algoritmos de optimización, como RANSAC o ICP, para estimar la transformación que mejor alinea las características correspondientes.

Algunos ejemplos de estos métodos utilizan escala de grises de imágenes y reflectividad de nubes de puntos: (Pandey et al., 2012; Taylor and Nieto, 2012); otros casan bordes de Canny (Canny, 1986) para la imagen y bordes en discontinuidades en profundidad para LiDAR: (Yuan et al., 2021; Liu et al., 2022); y otros como (Ma et al., 2021) que usa líneas detectadas tanto en cámara como en LiDAR.

Estos métodos son menos sensibles a las variaciones en la apariencia y la geometría del entorno que los métodos basados en movimiento, pero pueden ser más sensibles al ruido y a las ambigüedades en las correspondencias de características.

2.2. Target-based

Los métodos basados en un *target* emplean un objeto de calibración específico, como, por ejemplo patrón de calibración, o un patrón basado en marcas ArUco (Romero-Ramirez et al., 2018), para establecer una correspondencia precisa entre los sistemas de cámara y LiDAR. Algunos de estos ejemplos utilizan el algoritmo PnP (Fischler and Bolles, 1981) para calibrar el sistema cámara LiDAR como en (Cui et al., 2020; Wang et al., 2017), mientras que otros emplean otros métodos basados en ICP (Dhall et al., 2017).

Estos métodos suelen ser precisos y fiables, pero requieren la presencia de un objeto de calibración en la escena, lo que

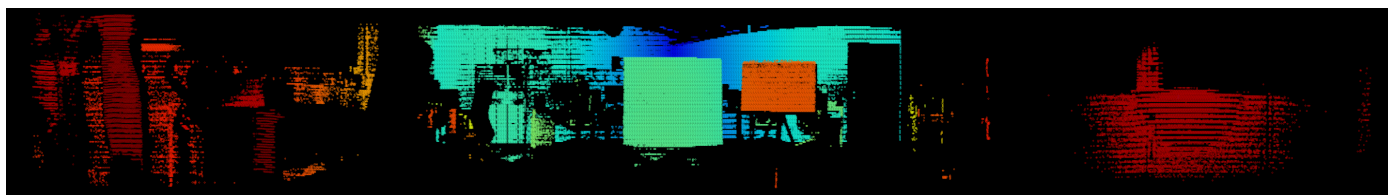


Figura 1: Proyección equirectangular de una nube de puntos con dos planos de referencia a la que se le ha aplicado un filtro de reflectividad. La zona negra indica que no hay puntos. El mapa de color va de rojo para puntos más cercanos hasta azul para puntos más lejanos.

puede ser inconveniente en algunas aplicaciones. Dichos objetos son fácilmente detectables tanto en la imagen como en la nube de puntos, mediante el uso de algoritmos, lo que nos permite obtener la relación tridimensional entre la cámara y LiDAR.

En (Verma et al., 2019) y (Zhou et al., 2018) se presentan dos métodos diferentes para la calibración de un sistema LiDAR y cámara fisheye. Ambos métodos proponen una eliminación inicial de la distorsión de la imagen del modelo *fish-eye*, convirtiendo la imagen a un modelo *pin-hole*. Como resultado la imagen *pin-hole* facilita la detección automática de patrones de calibración. En estos casos, la modificación del modelo de la imagen puede no ser perfectamente precisa, al igual que puede ocurrir con una calibración. En este artículo, se propone un método en el que se elimina dicho paso, y mediante el uso de un patrón de calibración (un plano rectangular con medidas conocidas), relacionamos la posición 3D del patrón de manera directa entre los sistemas de cámara y LiDAR.

3. Método Propuesto

El método desarrollado en este artículo se centra en el cálculo de la transformación relativa entre sistemas. Se utiliza el algoritmo de Kabsch (Kabsch, 1976), también conocido como el algoritmo de Kabsch-Umeyama (Umeyama, 1991), que permite hallar la rotación y translación entre dos conjuntos de puntos en un espacio 3D.

El método propuesto se divide en las siguientes partes.

- a Cálculo de los parámetros de calibración de la cámara fisheye mediante la *toolbox* presentada en (Scaramuzza et al., 2006).
- b Obtención de un conjunto de puntos 3D pertenecientes al plano en coordenadas del LiDAR (Apartado 3.1)
- c Extracción de un conjunto de puntos 3D pertenecientes al plano en coordenadas de cámara (Apartado 3.2)
- d Cálculo de la transformación entre ambos sistemas de referencia.

Mientras que mediante el LiDAR podemos estimar más fácilmente su posición, ya que conocemos las coordenadas de los puntos directamente en el espacio 3D; las coordenadas 3D de las esquinas respecto a la cámara no se pueden obtener de una manera tan directa. Para hallar las coordenadas 3D de los puntos respecto de la cámara, se realiza una conversión de la imagen fisheye a una proyección esférica unitaria, transformando las coordenadas 2D a unas coordenadas 3D con norma unitaria. Esta reproyección al espacio 3D unitario se realiza en base a los parámetros intrínsecos conocidos de la cámara (calculados en el paso a)).

3.1. Coordenadas 3D LiDAR

Desde un punto de vista externo, la obtención de las coordenadas 3D de las esquinas puede parecer sencilla, ya que el propio LiDAR ofrece las coordenadas tridimensionales de los puntos en el espacio, pero no se conoce con exactitud qué puntos pertenecen al plano. Además, se necesita conocer la posición de los bordes y esquinas que delimitan dicho plano de la manera más certera posible, y dicha información tampoco la podemos obtener de una lectura directa de la nube de puntos. El proceso a llevar a cabo sigue la estructura de la Figura 2.

El primer paso es reconocer qué puntos de la nube corresponden al plano de referencia. Se considera que el plano de calibración produce un conjunto de n puntos reflejados en el LiDAR ${}^L P = \{{}^L \vec{p}_1, {}^L \vec{p}_2, \dots, {}^L \vec{p}_N\}$. Para ello, mediante la inspección visual de una imagen de rango, como la de la Figura 1, se selecciona manualmente cualquier punto del plano ${}^L \vec{p}_i$. Mediante el uso de un *kd-tree* de la nube de puntos, se buscan los puntos vecinos a ${}^L \vec{p}_i$ que se encuentren dentro de un radio r , los cuales se van añadiendo al conjunto ${}^L P$. De esta manera desarrollamos el Algoritmo 1.

Algorithm 1 Algoritmo para la obtención de los puntos LiDAR pertenecientes al plano

Require: ${}^L P, kdtree, r$

Ensure: ${}^L P$

```

1:  ${}^L P_i = \text{EncuentraPuntosRadio}(kdtree, r, {}^L P)$ 
2: while tamaño de  ${}^L P_i$  es distinto de 0 do
3:   for  ${}^L p_i$  en  ${}^L P_i$  do
4:      ${}^L P_j = \text{EncuentraPuntosRadio}(kdtree, r, {}^L p_i)$ 
5:      ${}^L P'_i \leftarrow {}^L P'_i \cup {}^L P_j$ 
6:   end for
7:   EliminarPuntosRepetidos( ${}^L P'_i$ )
8:    ${}^L P_i \leftarrow {}^L P'_i$ 
9:    ${}^L P \leftarrow {}^L P \cup {}^L P_i$ 
10: end while
    
```

Para continuar el proceso, se procede a estimar la ecuación del plano al cual pertenece el conjunto de puntos del plano ${}^L P$. Mediante el uso de un algoritmo RANSAC (Fischler and Bolles, 1981) se obtiene una ecuación del plano, del cual se extrae su vector normal y se proyectan los puntos ${}^L P$ en él. Por último, mediante la obtención del vector normal de dicho plano, se cambia al sistema de referencia del plano para trabajar sobre el conjunto de puntos proyectados ${}^L P'$ en coordenadas 2D, eliminando la coordenada que correspondería con la profundidad.

Finalmente, para delimitar el plano que envuelve a ${}^L P'$, se procede a hallar el plano de área mínima que envuelva dicho conjunto. Para ello se rota ${}^L P'$ repetidamente un ángulo

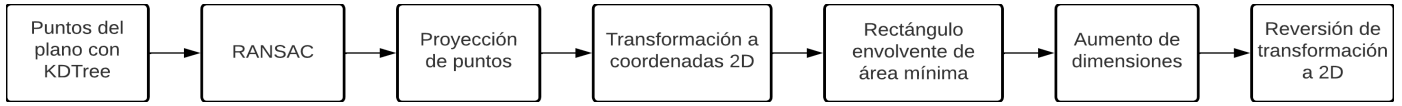


Figura 2: Diagrama de bloques con los pasos para obtener las coordenadas 3D de las esquinas del plano.

$\alpha \in [0, \pi/2]$, obteniendo la coordenada máxima y mínima de cada eje que determinaría un plano rectangular que contiene a $L_{P'}$ rotado. El rectángulo de área mínima tendrá una orientación $\rho = -\alpha_{Area_{min}}$. Por último, manteniendo fija la orientación del rectángulo de área mínima envolvente y su centro, se aumentan, en caso de ser necesario, las dimensiones de ancho y alto del rectángulo, igualándolas a las del plano de referencia real. Una vez conocida la posición de las esquinas en 2D, se realiza la transformada inversa aplicada anteriormente para obtener las coordenadas 3D del sistema global, obteniendo, en última instancia, las coordenadas 3D de las esquinas del plano.

3.2. Coordenadas 3D de cámara

Para hallar las coordenadas de las esquinas de un plano en el espacio a partir de una imagen *fisheye*, se plantea un problema basado en un sistema de ecuaciones no lineal sobredeterminado.

Partimos de la base que se conocen las dimensiones del plano, lo cual, proporciona ecuaciones de distancia entre las esquinas; además, se puede hallar la proyección de la imagen *fisheye* a una esfera unitaria (Figura 3) a partir de una función que requiere de los parámetros de calibración de la cámara.

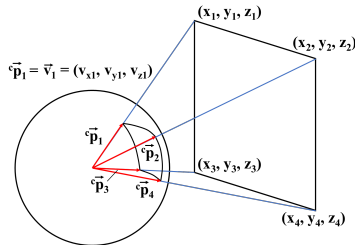


Figura 3: Representación de la proyección del plano sobre la esfera unitaria.

3.2.1. Detección del plano en la imagen

El primer paso es hallar las esquinas del plano en la imagen. Para ello se hace uso de Segment Anything, desarrollado en (Kirillov et al., 2023) para segmentar el plano. Una vez obtenida la máscara del plano, se aplica una pequeña dilatación a dicha máscara para ocupar de manera efectiva el plano en su totalidad. Por último, obteniendo los puntos del contorno de la máscara más alejados de su centroide, se aplica *k-means* para dividirlos en cuatro grupos; y mediante RANSAC, seleccionando para cada esquina uno de los puntos de su grupo, se obtienen los puntos que maximicen la suma de las seis posibles distancias entre ellos.

3.2.2. Proyección de los puntos a la Esfera Unitaria

Para transformar las coordenadas 2D de la imagen a 3D hacemos uso del trabajo desarrollado en (Scaramuzza et al., 2006). Mediante una función que requiere de los parámetros de calibración de la cámara y de las coordenadas 2D de la imagen, se halla la correspondencia de cada píxel a la esfera unitaria,

o lo que es lo mismo, un vector unitario en la dirección 3D de cada punto de la imagen.

$$x = x_0 + v_x t \quad y = y_0 + v_y t \quad z = z_0 + v_z t \quad (1)$$

Gracias a la obtención del vector unitario \hat{p}_1 , visible en la Figura 3, se conoce que las coordenadas 3D que se quieren encontrar (esquinas del plano), se encuentran en la recta definida con el vector unitario (v_1 en la Figura 3) y punto de origen $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$ (1).

3.2.3. Sistema de Ecuaciones

El objetivo final es el de hallar las coordenadas de cuatro puntos en el espacio, correspondientes a las esquinas del plano de referencia, lo que supone un total de doce incógnitas, tres coordenadas por cada uno de los cuatro puntos. Las ecuaciones de las rectas desarrolladas en (1) proporcionan un total de dos ecuaciones por punto (2), que para las cuatro esquinas del plano, suponen un total de ocho ecuaciones.

$$xv_y = yv_x \quad xv_z = zv_x \quad (2)$$

Al tratarse de un plano, se puede plantear una nueva ecuación que restrinja que los puntos pertenezcan todos a un mismo plano. Para ello planteamos la siguiente ecuación (3):

$$\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & x_1 - x_3 & x_1 - x_4 \\ y_1 - y_2 & y_1 - y_3 & y_1 - y_4 \\ z_1 - z_2 & z_1 - z_3 & z_1 - z_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

Como se ha comentado con anterioridad, conocemos las dimensiones del plano rectangular (anchura w , altura h y diagonal d), por lo que podemos plantear un total de seis ecuaciones basadas en las distancias entre los puntos (dos para cada distancia), las cuales tendrían la siguiente forma (4):

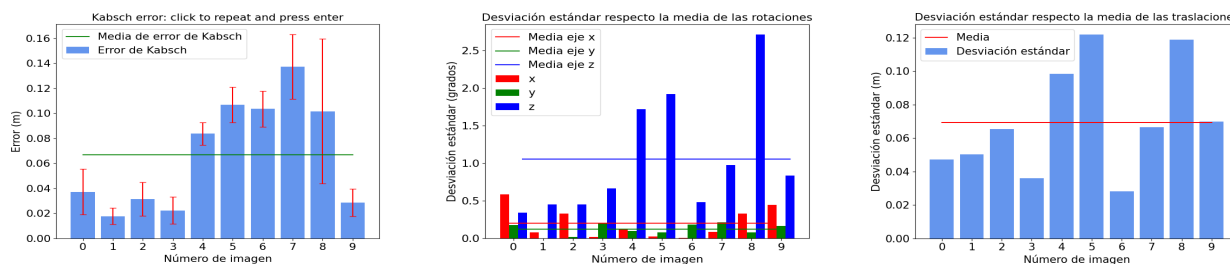
$$w^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \quad (4)$$

Finalmente, se han planteado un total de 15 ecuaciones para 12 incógnitas, tratándose de un sistema sobredeterminado con múltiples soluciones. El sistema se puede resolver por mínimos cuadrados o se puede reducir el número de ecuaciones. Si se consideran redundantes las ecuaciones referentes a las diagonales y se elimina una de las correspondientes con la altura dejando sólo las tres primeras ecuaciones (4), se puede resolver el sistema por métodos de optimización. Usando como estimación inicial las esquinas obtenidas del LiDAR.

3.3. Algoritmo de Kabsch

Obtenidos los dos conjuntos de puntos en el espacio 3D (uno expresado en el sistema de referencia de la cámara y otro en el del LiDAR), se procede a hallar la transformación relativa entre ambos sistemas, mediante el algoritmo de Kabsch (Kabsch, 1976).

El algoritmo de Kabsch es un método que calcula la rotación y translación óptima entre dos sistemas minimizando la desviación de error cuadrático medio.



(a) Error y desviación media al calcular la transformación con el algoritmo de Kabsch (b) Desviación estándar respecto de la rotación media (c) Desviación estándar respecto de la traslación media

Figura 4: Gráficos con los datos obtenidos en el experimento

4. Experimentos

4.1. Software desarrollado

Para el desarrollo de los experimentos, se ha llevado a cabo la programación en Python de una aplicación. En la Figura 1 se presenta una imagen de rango, donde cada píxel tiene un valor proporcional a la distancia del punto al centro del sensor LiDAR. Se ha empleado un mapa de color para destacar mejor las distancias. La aplicación desarrollada permite seleccionar manualmente el plano. A continuación, se utiliza el Algoritmo 1 para obtener los puntos del plano. Seguidamente, existe la opción de visualizar el plano detectado (Figura 5).

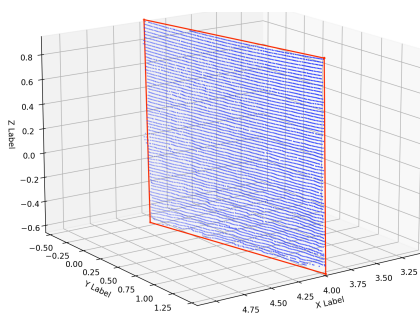


Figura 5: Conjunto de puntos con sistema de referencia de LiDAR pertenecientes al plano en azul y estimación de la posición de las esquinas y bordes en rojo.

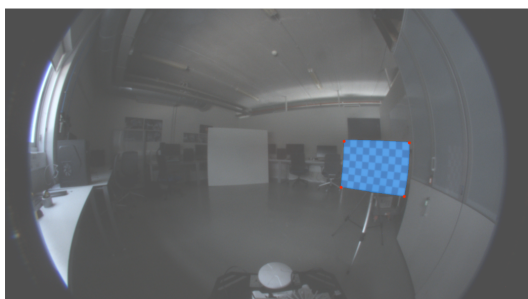


Figura 6: Imagen obtenida con la cámara fisheye con la máscara del plano segmentado mediante Segment Anything y las esquinas encontradas de manera automática.

Por último se muestra la imagen fisheye (Figura 6) para, de manera manual, seleccionar el plano, que mediante el uso del software desarrollado en (Kirillov et al., 2023) y aplicando más tarde un *clustering* al contorno filtrado, se obtiene la posición de

las esquinas en la imagen mediante RANSAC (Apartado 3.2.1). Resolviendo el sistema de ecuaciones propuesto en 3.2.3, finalmente se obtienen las coordenadas 3D de las esquinas respecto de la imagen. Al calcular la transformación entre cámara y LiDAR, se proyecta el LiDAR sobre la imagen, para de manera visual comprobar que la calibración se ha realizado de manera correcta.

4.2. Equipos

Para llevar a cabo los experimentos se usó una cámara DFK 33UX264, con una lente fisheye Fujinon FE185C057HA-1 con un campo de visión de 185 y un LiDAR Ouster OS1-128 de 128 canales, un rango de visión de 45 y hasta 90 m de alcance. El montaje usado en los experimentos se muestra en la Figura 7.

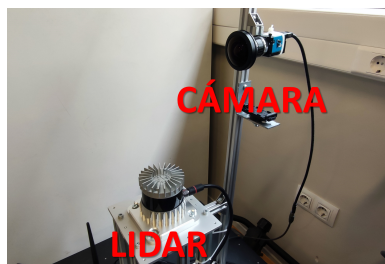


Figura 7: Montaje del sistema cámara-LiDAR

4.3. Diseño de los experimentos

Para hallar la rotación y traslación relativa entre la cámara y el LiDAR se usan diez pares de imágenes y nubes de puntos para promediar estos datos. De esta manera también se puede calcular la desviación media.

Para intentar aumentar la precisión a la hora de calcular la transformación, se decide usar dos planos de distintos tamaños, como se observa en la figura 6.

5. Resultados

En primer lugar, tras realizar los experimentos, medimos el error al aplicar el algoritmo de Kabsch (Figura 4(a)). Se calcula el error medio y desviación estándar midiendo las distancias entre las esquinas correspondientes de la cámara y LiDAR una vez este se ha transformado al sistema de referencia de la cámara. Se observa que el error medio obtenido al aplicar el algoritmo de Kabsch es inferior a los 7 cm.

Como se puede observar en la Figura 4(b), la rotación con mayor desviación es la del eje z , alejándose algo más de un grado de media de la rotación media en z . Mientras tanto, en la Figura 4(c) observamos que el desviación obtenida respecto a la translación media es de unos 7 cm.

Al transformar los puntos LiDAR a coordenadas de la cámara mediante el cálculo de su transformada (rotación y translación media), y re proyectarlos sobre la imagen *fisheye*, se puede observar el resultado obtenido en la Figura 8.

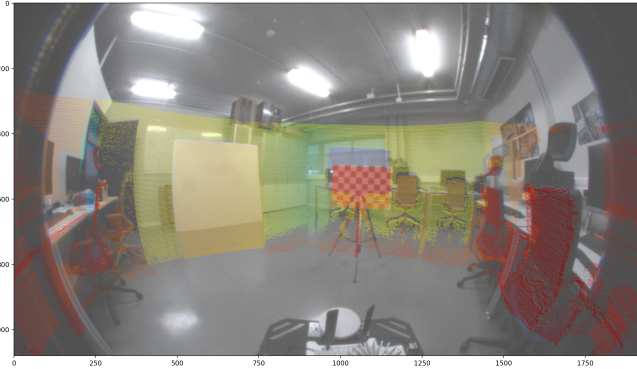


Figura 8: Proyección de la nube de puntos sobre la imagen *fisheye* tras haber transformado los puntos LiDAR a coordenadas de la cámara.

6. Conclusiones

Tras plantear un método de calibración de Lidar y cámara *fisheye*, el cuál detecta características de imágenes y nubes de puntos de manera automática, basado en la transformación obtenida mediante el algoritmo de Kabsch; se puede concluir que se trata de un método útil y que puede emplearse para el uso de sistemas que fusionen dichos elementos.

Se puede concluir que la calidad de los resultados depende de la precisión en la obtención de las correspondencias. Es fundamental que la calibración de la cámara sea lo más precisa posible para asegurar la proyección de los puntos de la imagen *fisheye* a una esfera unitaria de manera precisa.

El repositorio completo para calibración se puede descargar libremente desde¹

Agradecimientos

Esta publicación forma parte del proyecto TED2021-130901B-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationE”/PRTR” y del proyecto PROMETEO/2021/075 financiado por la Generalitat Valenciana.

Referencias

Abdelkader, A., Moustafa, M., 2023. Camera and lidar fusion for point cloud semantic segmentation. In: Yang, X.-S., Sherratt, S., Dey, N., Joshi, A. (Eds.), Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 499–508.

- Canny, J., 1986. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8 (6), 679–698.
- Cui, J., Niu, J., Ouyang, Z., He, Y., Liu, D., 2020. Acsc: Automatic calibration for non-repetitive scanning solid-state lidar and camera systems.
- Dhall, A., Chelani, K., Radhakrishnan, V., Krishna, K. M., 2017. Lidar-camera calibration using 3D-3D point correspondences.
- Fernández Alcantarilla, P., 09 2013. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces.
- Fischler, M. A., Bolles, R. C., jun 1981. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM* 24 (6), 381–395.
- Ishikawa, R., Oishi, T., Ikeuchi, K., 2018. Lidar and camera calibration using motion estimated by sensor fusion odometry.
- Iyer, G., Ram, R. K., Murthy, J. K., Krishna, K. M., oct 2018. *IEEE*.
- Kabsch, W., Sep 1976. A solution for the best rotation to relate two sets of vectors. *Acta Crystallographica Section A* 32 (5), 922–923.
- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P., Girshick, R., 2023. Segment anything.
- Li, Y., Yu, A. W., Meng, T., Caine, B., Ngiam, J., Peng, D., Shen, J., Wu, B., Lu, Y., Zhou, D., Le, Q. V., Yuille, A., Tan, M., 2022. Deepfusion: Lidar-camera deep fusion for multi-modal 3D object detection.
- Liu, X., Yuan, C., Zhang, F., 2022. Targetless extrinsic calibration of multiple small FoV LiDARs and cameras using adaptive voxelization. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71, 1–12.
- Lv, X., Wang, B., Ye, D., Wang, S., 2021. Lccnet: Lidar and camera self-calibration using cost volume network.
- Ma, T., Liu, Z., Yan, G., Li, Y., 2021. Crif: Automatic calibration and refinement based on line feature for lidar and camera in road scenes.
- Nistér, D., Naroditsky, O., Bergen, J., 01 2006. Visual odometry for ground vehicle applications. *J. Field Robotics* 23, 3–20.
- Pandey, G., McBride, J., Savarese, S., Eustice, R., 01 2012. Automatic targetless extrinsic calibration of a 3D lidar and camera by maximizing mutual information. *Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence* 26.
- Pang, S., Morris, D., Radha, H., 2020. Clocs: Camera-lidar object candidates fusion for 3D object detection.
- Romero-Ramirez, F., Muñoz-Salinas, R., Medina-Carnicer, R., 06 2018. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing* 76.
- Scaramuzza, D., Martinelli, A., Siegwart, R., 2006. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras. In: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 5695–5701.
- Schneider, N., Piewak, F., Stiller, C., Franke, U., 2017. Regnet: Multimodal sensor registration using deep neural networks.
- Taylor, Z., Nieto, J. I., 2012. Automatic calibration of lidar and camera images using normalized mutual information.
- Umeyama, S., 1991. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13 (4), 376–380.
- Verma, S., Berrio, J. S., Worrall, S., Nebot, E., 2019. Automatic extrinsic calibration between a camera and a 3D lidar using 3D point and plane correspondences. In: *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. pp. 3906–3912.
- Wang, W., Sakurada, K., Kawaguchi, N., 2017. Reflectance intensity assisted automatic and accurate extrinsic calibration of 3D lidar and panoramic camera using a printed chessboard. *Remote Sensing* 9 (8).
- Yuan, C., Liu, X., Hong, X., Zhang, F., 2021. Pixel-level extrinsic self calibration of high resolution lidar and camera in targetless environments.
- Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (11), 1330–1334.
- Zhao, L., Zhou, H., Zhu, X., Song, X., Li, H., Tao, W., 2021. Lif-seg: Lidar and camera image fusion for 3D lidar semantic segmentation.
- Zhiyi, Z., Tang, Q., 07 2016. Camera self-calibration based on multiple view images. pp. 88–91.
- Zhou, L., Li, Z., Kaess, M., 2018. Automatic extrinsic calibration of a camera and a 3D lidar using line and plane correspondences. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 5562–5569.

¹github.com/ARVCUMH/fisheye_lidar_calibration