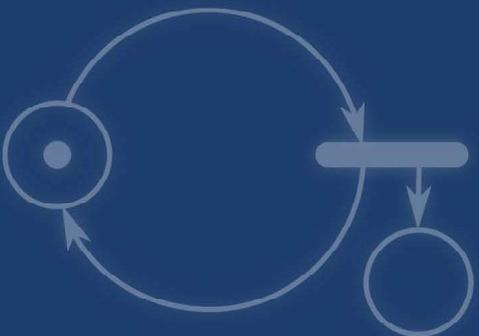
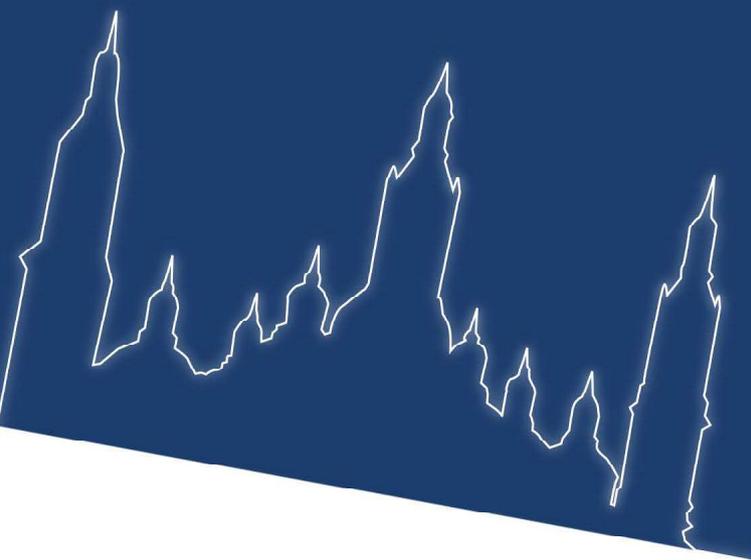


XLIV JORNADAS DE AUTOMÁTICA



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 Peidró 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, Gorka 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

Estimación de zonas transitables en nubes de puntos 3D con redes convolucionales dispersas

Santo, A.^{a,b,*}, Gil, A.^a, Valiente, D.^a, Ballesta, M.^a, Reinoso, O.^{a,b}

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

^bValencian Graduate School and Research Network of Artificial Intelligence (valgrAI), Camí de Vera S/N, Edificio 3Q, 46022 Valencia, España

To cite this article: Santo, A., Gil, A., Valiente, D., Ballesta, M., Reinoso, O. 2023. Estimación de zonas transitables en nubes de puntos 3D con redes convolucionales dispersas. XLIV Jornadas de Automática, 732-737
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.732>

Resumen

La correcta evaluación del entorno en tareas como la navegación de robots terrestres o la conducción autónoma de vehículos se debe considerar un requisito mínimo para dotar de independencia a un sistema robótico. En concreto, la navegación de un robot en entornos desconocidos, naturales y desestructurados precisa contar con técnicas que permitan seleccionar sobre qué zonas puede circular el robot. Con el fin de poder aumentar la soberanía de las decisiones autónomas del sistema, en este artículo se propone un método para la evaluación de las nubes de puntos 3D obtenidas mediante un LiDAR con objeto de obtener las zonas transitables, tanto en entornos de carretera como en entornos naturales. Concretamente, se propone una configuración codificador-decodificador dispersa entrenada con características invariantes a rotación, que tiene como fin replicar los datos de entrada asociando a cada punto las características de transitabilidad aprendidas. Los resultados experimentales muestran la robustez y efectividad del método propuesto en entornos de exteriores, llegando a mejorar los resultados de otros enfoques.

Palabras clave: Robots móviles autónomos, Inteligencia Artificial, Redes Neuronales, Segmentación Semántica, Aprendizaje y adaptación en vehículos autónomos, Percepción y detección

Estimation of traversable zones in 3D point clouds with sparse convolutional networks.

Abstract

The correct assessment of the environment in tasks such as ground robot navigation or autonomous vehicle driving should be considered a minimum requirement to provide independence to a robotic system. In particular, the navigation of a robot in unknown, natural and unstructured environments requires techniques to select over which areas the robot can circulate. In order to increase the autonomy of the system's decisions, this paper proposes a method for the evaluation of 3D point clouds obtained by LiDAR in order to obtain traversable areas, both in road and natural environments. Specifically, a sparse encoder-decoder configuration trained with rotation invariant features is proposed, which aims to replicate the input data by associating to each point the learned traversability features. Experimental results show the robustness and effectiveness of the proposed method in outdoor environments, improving the results of other approaches.

Keywords: Autonomous Mobile Robots, Artificial Intelligence, Neural Networks, Learning and adaptation in autonomous vehicles, Perception and sensing

1. Introducción

La respuesta a la pregunta ¿Por dónde debería caminar?, formulada en (Wellhausen et al., 2019) contiene implícito el entendimiento de todo aquello que rodea al robot con objeto de

poder navegar por el entorno. Este concepto que se presupone innato del ser humano, es deseable extrapolarlo a robots móviles autónomos ya que permite la planificación y navegación segura en diversas aplicaciones como, por ejemplo, la exploración

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

ción de entornos desconocidos, la conducción autónoma, aplicaciones de búsqueda y rescate o agricultura (Sancho-Pradel and Gao, 2010).

Hasta la fecha, los algoritmos de planificación de trayectorias se clasifican atendiendo a dos conceptos fundamentales: a) la forma de definir y representar el espacio; b) la manera en la que se representan las zonas transitables en el mapa. Así, atendiendo al primer concepto, encontramos diferentes representaciones del espacio como pueden ser: mapas de ocupación 2D (Moravec and Elfes, 1985), mapas de ocupación basados en vóxeles 3D (Hornung et al., 2013; Oleynikova et al., 2017) o mapas de elevación (DEM) (Langer et al., 1994), en los cuales se establece con cierta probabilidad que un determinado espacio esté o no ocupado, y se considera si es transitable o no según parámetros físicos del robot, confluyendo así, en el segundo de los conceptos fundamentales mencionados.

Sin embargo, los enfoques clásicos mencionados anteriormente, no son lo suficientemente robustos cuando se generaliza a todo tipo de entornos (Xiao et al., 2022). Este hecho, junto con una sensorización de los equipos más sofisticada, si atendemos a características como el coste, resolución y ligereza, justifica abordar el cálculo de la transitabilidad bajo un nuevo paradigma: el aprendizaje automático supervisado, basado en redes neuronales. Concretamente en los últimos años se ha popularizado el empleo de sensores LiDAR para extraer los datos de partida de algoritmos basados en redes neuronales, debido a los motivos mencionados anteriormente sobre sensorización y por la inmutabilidad que presentan en diferentes condiciones de iluminación frente a otros sensores ópticos como las cámaras. Este artículo constituye una contribución a la estimación de la transitabilidad en terrenos complejos utilizando técnicas de aprendizaje profundo, en particular métodos de segmentación de una escena descrita por medio de nubes de puntos 3D.

Se ha organizado el resto del documento de la siguiente manera: en el apartado 2 se presenta un resumen de los trabajos más significativos en el ámbito del Aprendizaje Profundo para el cálculo de la transitabilidad. Seguidamente, se comentarán los conceptos en los que se basa nuestro método y su posterior explicación. Para finalizar se realizará un estudio de los resultados experimentales obtenidos teniendo en consideración los diferentes tipos de entornos que se han destinado al proceso de entrenamiento y las conclusiones que se pueden extraer de dicha experimentación.

2. Estado del arte

2.1. Métodos convencionales de ML

Se trata de algoritmos que generalmente parten de representaciones alternativas de los datos de entrada, es decir, actúan sobre características extraídas a partir de los datos y que se consideran discriminantes para el problema a resolver. Esta estrategia se emplea en (Bellone et al., 2017), donde se utilizan pares de imágenes estéreo como datos de entrada. Se realiza un estudio de las características geométricas y de apariencia más discriminantes para el problema de la transitabilidad en entornos urbanos a partir del entrenamiento de un clasificador SVM (*Support-Vector Machine*) (Vapnik, 1999), concluyendo que las características que incluyen el cálculo de los vectores normales son las más adecuadas para esta tarea. En (Kragh et al., 2015)

se propone el cálculo de características basadas en un vecindario local para cada punto (obtenido mediante un sensor LiDAR 3D), con el fin de clasificarlos en: suelo, vegetación u objeto. En esta propuesta se propone un radio de vecindad adaptativo para paliar la pérdida de densidad de puntos inherente a los sensores LiDAR. De esta manera, se garantiza una alta resolución a corta distancia y evita las características ruidosas a larga distancia.

Uno de los mayores problemas que tienen los trabajos anteriores, es la necesidad de que un experto genere etiquetas de la clase a la que pertenece cada punto. Por ello existen trabajos que automatizan este proceso entrenando los clasificadores con datos simulados como (Martinez et al., 2020) que trata de describir nubes de puntos extraídas del simulador GAZEBO a partir del análisis de las direcciones principales (PCA) en un determinado entorno de vecindad.

2.2. Redes neuronales

Los sensores LiDAR producen, a su salida, la posición de un conjunto de puntos 3D. Estos puntos 3D corresponden con la primera reflexión producida por un objeto cuando se ilumina con un rayo láser colimado. La condición 3D de este tipo de dato, implica un aumento de memoria y computación en un factor cúbico. En relación con este hecho, se han desarrollado alternativas que permiten de forma eficiente trabajar con datos tridimensionales. Por ejemplo, en (Velas et al., 2018) se transforman nubes de puntos en imágenes multicanal que almacenan la profundidad, altura y reflectividad de cada punto. Estas imágenes se procesan a través de capas convoluciones densas para aprender qué zonas son transitables. Otra solución es la presentada en (Razani et al., 2021) donde se realizan proyecciones esféricas de las nubes de puntos para, posteriormente, aplicar capas convolucionales 2D y resolver un problema de segmentación semántica. Una solución diferente se presenta en (Wang et al., 2017), donde se hace uso de árboles octales u *octrees* para reducir la complejidad del espacio que describen las nubes de puntos. En esta propuesta se restringen las operaciones de convolución densa a aquellos octantes que están ocupados. Esta misma idea se extiende en (Frey et al., 2022) quienes calculan la transitabilidad del espacio a través de la generalización de la operación de convolución a n -dimensiones basándose en (Choy et al., 2019) y empleando una configuración de codificador-decodificador disperso.

3. Descripción del método

3.1. Formulación del problema

Se considera el problema de la evaluación de zonas transitables como una tarea de segmentación semántica de una nube de puntos $B = (P, F, L) = \{(\vec{p}_i, \vec{f}_i, l_i), i = 1, \dots, N\}$, donde N es el número total de puntos de la nube, l_i la condición de transitabilidad, $\vec{p}_i \in \mathbb{R}^3$ y $\vec{f}_i \in \mathbb{R}^{d_{in}}$, siendo d_{in} la dimensionalidad de las características de entrada asociadas a cada punto de la nube. Se considera que cada punto originado por el sensor LiDAR tiene coordenadas $\vec{p}_i = (x, y, z)_i$, expresadas en el sistema de coordenadas del propio sensor LiDAR. El objetivo consiste en inferir una clasificación $l_i \in [0, 1]$ que representa la clase a la que pertenece cada punto, en este caso, transitable (1) o no transitable (0). Definiendo así el problema como una clasificación binaria del entorno punto por punto.

3.2. Convolución dispersa

La operación de convolución discreta originariamente nace en el ámbito del procesamiento de la señal. Sin embargo, en los últimos años, se vincula directamente con el procesamiento de imágenes y el aprendizaje automático supervisado (Redes Neuronales), dando lugar a las Redes Neuronales convolucionales.

Si bien, este tipo de redes muestran una gran eficacia en problemas como clasificación y segmentación en imágenes. Su propia naturaleza secuencial e iterativa provocaría una gran ineficiencia computacional de la operación de convolución 2D en datos que no necesariamente sean vectores, matrices o características densas sino datos en los que exista una dispersión. Entendida la dispersión como el distanciamiento del conjunto de valores que conforman el dato, se aprecia en matrices dispersas o nubes de puntos 3D. Es por ello que el concepto de convolución en una imagen, es decir en 2D, se debe generalizar a cualquier número de dimensiones; así nace la convolución dispersa.

Este tipo de convolución discreta (conocida como *sparse convolution* en la literatura inglesa) permite centrar el kernel de convolución en aquellos espacios discretizados donde existe un valor distinto de cero, rompiendo así con el clásico desplazamiento de una máscara 2D en el que se basa la operación de convolución en imágenes. Especialmente en nubes de puntos resulta muy eficiente este enfoque ya que existen muchos lugares de la nube donde no existen puntos y por tanto la operación de convolución en esos puntos solo resultaría en un consumo de tiempo y recursos innecesario.

Por tanto, dada una nube de puntos cualquiera B , se construye un tensor disperso S , formado, a su vez, por dos tensores $S = (T_C, T_F)$:

- T_C define las coordenadas de los puntos que conforman la nube original, \vec{p}_i , a los cuales se les aplica una función de parte entera para discretizar el espacio. Estos puntos pueden ser modificados según un factor de escala, v , que determina cómo se discretiza el espacio. Además, se añade el lote b_k al que pertenece cada nube de puntos, para facilitar el entrenamiento de la red. Así pues, el tensor T_C se define como:

$$T_C = \begin{bmatrix} b_1 & \vec{p}_1 \\ \vdots & \vdots \\ b_N & \vec{p}_M \end{bmatrix}, \text{ con } \vec{p}_j = \text{floor}(\vec{p}_i) = \text{floor}\left(\frac{x_i}{v}, \frac{y_i}{v}, \frac{z_i}{v}\right) \quad (1)$$

- T_F almacena y promedia las características \vec{f}_i asociadas a los puntos, m , que ocupan el mismo espacio, es decir que comparten las mismas coordenadas, \vec{p}_j , tras aplicar el factor de escala v y la función de parte entera.

$$T_F = \begin{bmatrix} \vec{f}_1 \\ \vdots \\ \vec{f}_M \end{bmatrix}, \text{ donde } \vec{f}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \vec{f}_i \text{ para } \vec{f}_i \in \vec{p}_j \quad (2)$$

Este procesamiento de los datos de entrada se lleva a cabo empleando la librería *Minkowski Engine*¹ (Choy et al., 2019).

3.3. Red Neuronal Dispersa

Se propone el empleo de una red neuronal con una configuración codificador-decodificador, cuya implementación es una variedad dispersa de la red neuronal convolucional Resnet20 (He et al., 2016) y la arquitectura de la red U-net (Ronneberger et al., 2015). Por tanto, la red se divide principalmente en dos partes:

- **Codificador:** la parte codificadora de la red es la encargada de la generación de descriptores de los puntos basándose en la convolución dispersa 3D de las características pertenecientes a cada punto. En este caso, durante la investigación, se probaron diferentes combinaciones de características de entrada tales como, las propias coordenadas de cada punto $\vec{p}_i = (x, y, z)_i$, los vectores normales a cada punto $\vec{N}_i = (n_x, n_y, n_z)_i$ y la combinación de ambas. Sin embargo con el fin de conseguir una invarianza de los resultados al aplicar rotación a la nube de puntos, se ha considerado que el vector $\vec{f}_i = (n_z, Z)$ siendo n_z la componente unitaria de la dirección Z del vector normal a cada punto, N_i , y la coordenada $Z \in [0, 1]$.
- **Decodificador:** la parte decodificadora de la red trata de reconstruir y extrapolar la información latente generada por el codificador hacia las coordenadas de la nube de puntos de entrada. A tal efecto, se emplean capas de convolución traspuesta. Además, se utiliza un mapeado de coordenadas donde se registra la traza de cambios en las coordenadas debido a las convoluciones.

La configuración de la red empleada se presenta en la Figura 1. Se trata de una representación esquemática que trata de distinguir los diferentes niveles de la red neuronal de forma descendente, mediante convoluciones dispersas y bloques de convolución, que simbolizan convoluciones dispersas secuenciales. Además, una vez finaliza el codificador el esquema continúa de forma ascendente a través de la concatenación de los descriptores de distintos niveles, indicada mediante el símbolo \oplus , y de convoluciones traspuestas para recuperar la forma original de la nube de puntos de entrada.

4. Resultados experimentales

4.1. Datasets

1) *SemanticKITTI*: se trata de un conjunto de datos basado en *KITTI Vision Benchmark* (Geiger et al., 2012) que reúne posiciones de odometría y la representación del entorno, recogida por el modelo de sensor *Velodyne HDL-64E*, asociada a dichas posiciones de forma independiente. Contiene en total 22 secuencias urbanas, que describen entornos altamente estructurados, de las cuales 10 contienen etiquetas para cada punto orientadas a problemas de segmentación semántica.

2) *Relis-3D* (Jiang et al., 2021): consiste en un conjunto de datos formado por 13.556 nubes de puntos divididas en 4 secuencias distintas capturadas por medio de un LiDAR OS1-64. A diferencia de *SemanticKITTI* se describen entornos y caminos rurales muy desestructurados.

¹<https://github.com/NVIDIA/MinkowskiEngine>

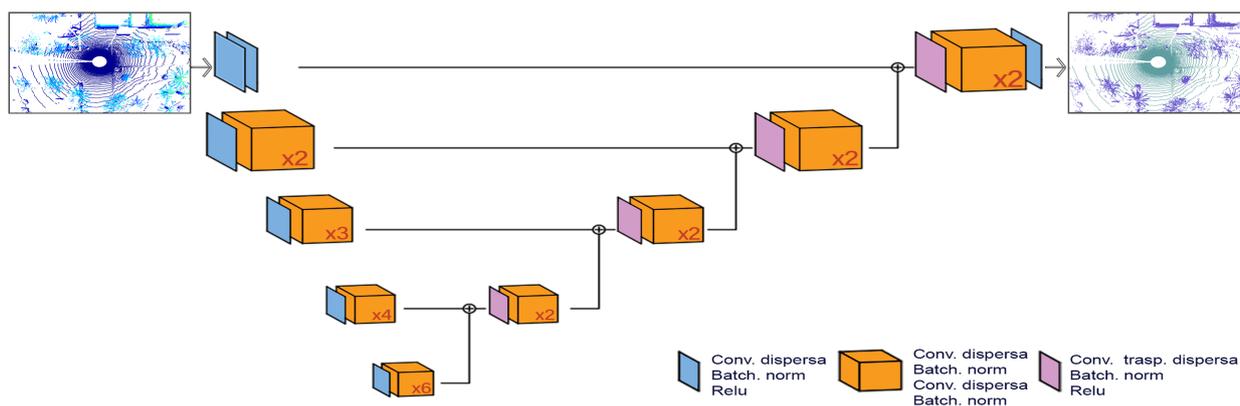


Figura 1: Configuración codificador-decodificador empleada, MinkUnet34 (Choy et al., 2019).

3) *SemanticUSL* (Jiang and Saripalli, 2021): la recogida de datos se da en una plataforma robótica, Clearpath Warthog, con un LiDAR OS1-64. Contiene 1200 nubes de puntos etiquetadas bajo el mismo formato que SemanticKITTI entre las cuales se incluyen escenas de carretera y ambientes naturales.

Todos los *datasets* mencionados, contienen alrededor de 25 etiquetas distintas a las que un punto puede pertenecer. Estas etiquetas incluyen conceptos semánticos como: arbusto, barro, asfalto, acera... etc. Atendiendo al problema de la transitabilidad tal y como lo hemos formulado anteriormente se han reetiquetado los *datasets* usando únicamente dos clases. Las Figuras 2(a) 2(c), 2(e), representan en diferentes colores el conjunto de clases originales de los *datasets*. Convirtiendo así etiquetas como acera, asfalto, vegetación baja o hierba, tierra, cemento y barro en la clase “transitable”, representada en color verde. Las etiquetas que se han convertido a la clase “no transitable”, representada en color violeta, son: árbol, persona, coche, camión, edificio, entre otras. Obteniendo así, unos datos de entrenamiento como los representados en las Figuras 2(b), 2(d), 2(f).

4.2. Entrenamiento de la red

De los conjuntos de datos mencionados anteriormente, únicamente se han utilizado para la etapa de entrenamiento algunas secuencias de *SemanticKITTI* y la totalidad de las secuencias de *Relis-3D*. El motivo de esta elección es contar con un número de ejemplos de entrenamiento equilibrado que incluya, por igual, entornos urbanos, entornos desestructurados y naturales. De esta manera, se evita que la red se especialice en un tipo de entorno en concreto. El uso de la base de datos SemanticUSL se limita exclusivamente a procesos de *test* con objeto de demostrar el poder de generalización de la red en entornos nunca vistos durante el entrenamiento.

Además, se han llevado a cabo diferentes entrenamientos empleando diferentes parámetros de escala para discretizar el espacio, como se verá en los siguientes apartados.

4.3. Efecto distancia

Al estudiar cómo interactúan los planos del LiDAR con el entorno que lo rodea, se observa que la distancia a la que cortan rayos o planos consecutivos del LiDAR con el suelo aumenta de acuerdo con la inversa de la tangente del ángulo que forman el

rayo del sensor con el plano de suelo, multiplicado por la altura a la que está situado el sensor. Así pues, a distancias muy alejadas, los diferentes planos láser se encuentran muy separados entre sí. Este efecto es fácil de apreciar en las vistas cenitales de un *scan* láser en la Figura 2. En consecuencia, la descripción de algunas regiones en el entorno del robot es muy inexacta, ya que la densidad de puntos LiDAR es muy baja. Este argumento se apoya en la Figura 3, que muestra la probabilidad de la existencia de puntos en base a la distancia según las observaciones de 2000 nubes de puntos. Se observa cómo, a partir de 45 metros, la probabilidad de encontrar puntos es casi nula.

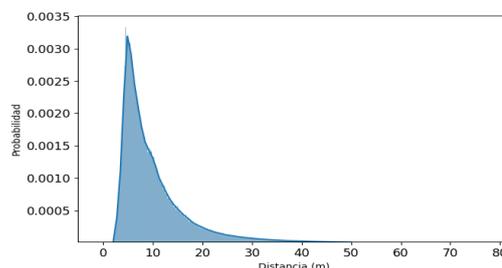


Figura 3: Función de densidad de probabilidad según la distancia.

Por tanto, como solución se propuso, considerar únicamente los puntos que se encuentran dentro de un radio de 45 metros del sensor y, por tanto, todas las evaluaciones y entrenamientos se han realizado bajo esta condición.

4.4. Evaluación cuantitativa

En la Figura 4 se presentan los resultados en términos de *precision* y *recall*. Para ello, se han realizado inferencias sobre todas las nubes de puntos que conforman el conjunto de datos de *test*. La clasificación de cada punto inferida por la red se compara con su *ground truth*, dando lugar a verdaderos positivos (1), verdaderos negativos (0), falsos positivos y falsos negativos.

Se puede observar como en las curvas pertenecientes a datos que describen entornos urbanos y más estructurados, Figuras 4(a) y 4(c), la relación entre *precision* y *recall* es cercana al máximo (esquina superior derecha). Por tanto podemos asumir que los modelos entrenados aprenden las zonas que son transitables y no transitables de forma muy consistente, logrando

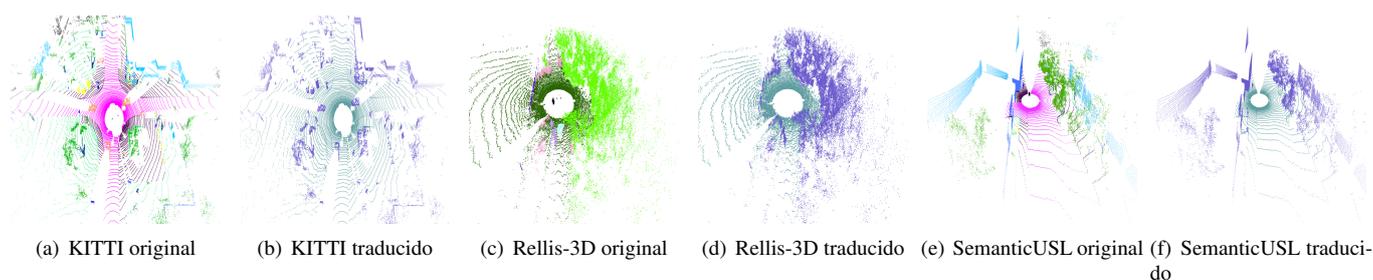


Figura 2: Traducción de las etiquetas originales a dos etiquetas de transitabilidad. Color verde: Transitable. Color violeta: No transitable.

valores de *precision* y *recall* superiores al 95 % para determinados puntos de trabajo. Además en estas curvas, se aprecia como el rendimiento es indiferente al parámetro de discretización, tamaño de *voxel*, o parámetro de escala, representado como v en la Ecuación (1), ya que se consiguen prácticamente los mismos valores.

Por otro lado, se observa en la Figura 4(b) que entornos desorganizados por la propia naturaleza, exentos de un control humano, son más difíciles de inferir correctamente qué zonas son o no adecuadas para atravesar. Igualmente, en este caso sí que es determinante la discretización del espacio de las nubes de puntos ya que se observan diferencias en el rendimiento dependiendo de este factor. La mejora de unos vóxeles con respecto de otros no parece seguir un orden lógico, sino que para esos entornos en concreto, los valores intermedios del rango de vóxeles que se han probado son los que mejor relación *precisión-recall* presentan.

Además, se ha realizado una comparación, Tabla 1, con diferentes trabajos enfocados principalmente a segmentación semántica pero que han sido reentrenados para el estudio de la transitabilidad por (Fusaro et al., 2023) de la misma forma que se ha planteado en el apartado 4.1, con el conjunto de datos *SemanticKITTI*.

Método	Accuracy	F1 score	mIoU
(Redmon and Farhadi, 2018)	93.4	93.0	87.4
(Wu et al., 2018)	90.1	89.4	81.4
(Wu et al., 2019)	92.3	91.9	85.5
(Qi et al., 2017)	90.0	93.0	87.4
(Fusaro et al., 2023)	89.2	91.4	84.9
Método propuesto	96.6	95.9	92.3

Tabla 1: Comparación de resultados sobre secuencias de *SemanticKITTI* 0-10.

4.5. Evaluación cualitativa

En la Figura 5(b), se pueden observar los resultados de una forma visual, en la que se muestran en distintos colores los parámetros que conforman la matriz de confusión: verdaderos positivos (azul), verdaderos negativos (verde), falsos positivos (rojo) y falsos negativos (negro). La Figura 5(a) representa una nube de puntos perfectamente etiquetada y la Figura 5(b) representa la inferencia de la red neuronal con los errores en color negro y rojo y los aciertos en color verde y azul según se ha descrito anteriormente. Las zonas más conflictivas en las que la inferencia no es correcta son aquellas zonas donde las geometrías que forman los puntos son desordenadas (falsos positivos) y donde se da el comienzo de una geometría y el final de

otra (bordes), ya que los vóxeles toman puntos de ambos elementos y la media de las características se distorsiona porque se convierte en una fusión de ambas geometrías.

En este punto, es importante considerar que los falsos positivos (clasificados por la red como transitables, pero que son realmente no transitables) son realmente peligrosos en una tarea de navegación del robot.

5. Conclusión

En este trabajo se ha presentado un método para la estimación de la transitabilidad en nubes de puntos que utiliza una red neuronal dispersa y una configuración de codificador-decodificador. Los resultados obtenidos demuestran una gran robustez de la solución tanto en entornos muy estructurados como en entornos naturales o desestructurados, atendiendo al análisis realizado en cuanto a la discretización del entorno. El estudio demuestra que la estimación de la transitabilidad es una tarea más complicada en entornos naturales muy desordenados y con disposiciones que no siguen ninguna norma de los elementos.

6. Reconocimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación ValgrAI, *Valencian Graduate School and Research Network of Artificial Intelligence* a través de una beca predoctoral. Además, 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

- Bellone, M., Reina, G., Caltagirone, L., Wahde, M., 2017. Learning traversability from point clouds in challenging scenarios. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19 (1), 296–305.
- Choy, C., Gwak, J., Savarese, S., 2019. 4D spatio-temporal convnets: Minkowski convolutional neural networks. In: *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 3075–3084.
- Frey, J., Hoeller, D., Khattak, S., Hutter, M., 2022. Locomotion policy guided traversability learning using volumetric representations of complex environments. In: *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 5722–5729.
- Fusaro, D., Olivastrì, E., Evangelista, D., Imperoli, M., Menegatti, E., Pretto, A., 2023. Pushing the limits of learning-based traversability analysis for autonomous driving on cpu. In: *Intelligent Autonomous Systems 17: Proceedings of the 17th International Conference IAS-17*. Springer, pp. 529–545.

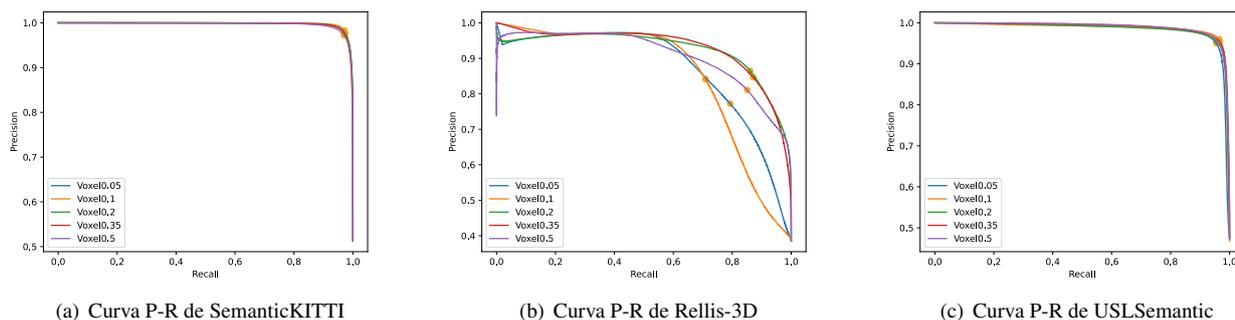


Figura 4: Curvas Precisión-Recall de la inferencia de la red sobre datos de test.

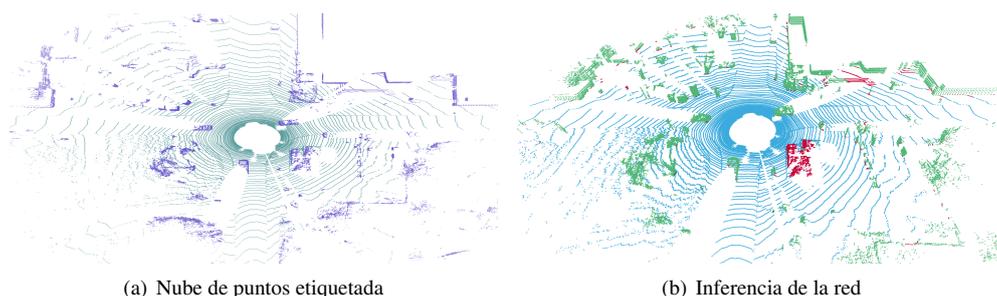


Figura 5: Representación visual de los resultados de inferencia de la red. En color azul, verdaderos positivos (TP), en color verde los verdaderos negativos (TN), en color rojo los falsos positivos (FP) y por último en color negro los falsos negativos (FN).

- Geiger, A., Lenz, P., Urtasun, R., 2012. Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. In: 2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. IEEE, pp. 3354–3361.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2016. Deep residual learning for image recognition. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. pp. 770–778.
- Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., Burgard, W., 2013. Octomap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous robots* 34, 189–206.
- Jiang, P., Osteen, P., Wigness, M., Saripalli, S., 2021. Rellis-3D dataset: Data, benchmarks and analysis. In: 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, pp. 1110–1116.
- Jiang, P., Saripalli, S., 2021. Lidarnet: A boundary-aware domain adaptation model for point cloud semantic segmentation. In: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 2457–2464.
- Kragh, M., Jørgensen, R. N., Pedersen, H., 2015. Object detection and terrain classification in agricultural fields using 3D lidar data. In: *Computer Vision Systems: 10th International Conference, ICVS 2015, Copenhagen, Denmark, July 6-9, 2015, Proceedings*. Springer, pp. 188–197.
- Langer, D., Rosenblatt, J., Hebert, M., 1994. A behavior-based system for off-road navigation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 10 (6), 776–783.
- Martinez, J. L., Moran, M., Morales, J., Robles, A., Sanchez, M., 2020. Supervised learning of natural-terrain traversability with synthetic 3D laser scans. *Applied Sciences* 10 (3), 1140.
- Moravec, H., Elfes, A., 1985. High resolution maps from wide angle sonar. In: *Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation*. Vol. 2. IEEE, pp. 116–121.
- Oleynikova, H., Taylor, Z., Fehr, M., Siegart, R., Nieto, J., 2017. Voxblox: Incremental 3D euclidean signed distance fields for on-board mav planning. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, pp. 1366–1373.
- Qi, C. R., Su, H., Mo, K., Guibas, L. J., 2017. Pointnet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 652–660.
- Razani, R., Cheng, R., Taghavi, E., Bingbing, L., 2021. Lite-hdseg: Lidar semantic segmentation using lite harmonic dense convolutions. In: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 9550–9556.
- Redmon, J., Farhadi, A., 2018. Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*.
- Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T., 2015. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, Proceedings, Part III* 18. Springer, pp. 234–241.
- Sancho-Pradel, D. L., Gao, Y., 2010. A survey on terrain assessment techniques for autonomous operation of planetary robots. *JBIS-Journal of the British Interplanetary Society* 63 (5-6), 206–217.
- Vapnik, V., 1999. *The nature of statistical learning theory*. Springer science & business media.
- Velas, M., Spanel, M., Hradis, M., Herout, A., 2018. Cnn for very fast ground segmentation in velodyne lidar data. In: 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). IEEE, pp. 97–103.
- Wang, P.-S., Liu, Y., Guo, Y.-X., Sun, C.-Y., Tong, X., 2017. O-cnn: Octree-based convolutional neural networks for 3D shape analysis. *ACM Transactions On Graphics (TOG)* 36 (4), 1–11.
- Wellhausen, L., Dosovitskiy, A., Ranftl, R., Walas, K., Cadena, C., Hutter, M., 2019. Where should I walk? predicting terrain properties from images via self-supervised learning. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4 (2), 1509–1516.
- Wu, B., Wan, A., Yue, X., Keutzer, K., 2018. Squeezeseg: Convolutional neural nets with recurrent crf for real-time road-object segmentation from 3D lidar point cloud. In: 2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, pp. 1887–1893.
- Wu, B., Zhou, X., Zhao, S., Yue, X., Keutzer, K., 2019. Squeezesegv2: Improved model structure and unsupervised domain adaptation for road-object segmentation from a lidar point cloud. In: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 4376–4382.
- Xiao, X., Liu, B., Warnell, G., Stone, P., 2022. Motion planning and control for mobile robot navigation using machine learning: a survey. *Autonomous Robots* 46 (5), 569–597.