



# 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
 <b>Control Inteligente</b>		
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
 <b>Modelado, Simulación y Optimización</b>		
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
 <b>Robótica</b>		
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, Gorra 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

## Detección de aeronaves en trayectoria de colisión de vuelo mediante optical flow

J.J. Cabrera<sup>a,\*</sup>, A. Gil<sup>a</sup>, L. Payá<sup>a</sup>, O. Reinoso<sup>a,b</sup>, D. Rodríguez<sup>c</sup>

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

<sup>b</sup>Valencian Graduate School and Research Network of Artificial Intelligence (valgrAI), Camí de Vera S/N, Edificio 3Q, 46022 Valencia, España.

<sup>c</sup>Abionica Solutions S.L.P., Avda. Jean Claude Combaldieu, 03008 Alicante, España.

**To cite this article:** Cabrera, J.J., Gil, A., Payá, L., Reinoso, O., Rodríguez, D. 2023. Detección de aeronaves en trayectoria de colisión de vuelo mediante optical flow. XLIV Jornadas de Automática, 843-848.  
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.843>

### Resumen

En este artículo se presenta un método que permite detectar UAVs mediante una única cámara instalada en una aeronave y, además, es capaz de predecir si existe riesgo de colisión. Se emplea la información del flujo óptico disperso presente en la imagen para: (1) modelar mediante una matriz de homografía el movimiento en la imagen debido al propio movimiento de la cámara, (2) compensar el movimiento en la imagen y (3) segmentar todo aquel flujo óptico cuyo movimiento es diferente al provocado por la cámara con objeto de detectar el UAV presente en el espacio aéreo. Además, se predice una posible colisión analizando la colinealidad existente entre el vector posición del UAV con su vector velocidad (salvo un factor de escala). Los resultados experimentales muestran que el método propuesto es efectivo en la detección, seguimiento y predicción de la colisión entre UAVs con independencia de su apariencia, tamaño y movimiento, lo que puede ser útil para aumentar la seguridad del espacio aéreo.

*Palabras clave:* Detección de UAVs, Predicción de la colisión, Flujo Óptico.

### Detection of Aircrafts in flight collision path using optical flow

#### Abstract

This paper presents an approach to detect, track and predict the collision of UAVs by means of a single camera mounted on an aircraft. The method is based on the computation of a sparse optical flow in the image in order to: (1) model the image motion due to the camera's own movement using a homography matrix, (2) compensate the image motion and (3) segment the optical flow whose movement is different from that caused by the camera in order to detect the UAV. Additionally, collisions are predicted by analyzing the collinearity between the position vector of the UAV and its velocity vector, which are estimated up to a scale factor. Experimental results show that the proposed method is effective in detecting, tracking, and predicting collisions with UAVs regardless of their appearance, size, and relative movement, which can be useful for airspace security applications.

*Keywords:* UAV detection, collision prediction, optical flow

## 1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), comúnmente conocidos como drones, se han hecho cada vez más populares en los últimos años, utilizándose en una amplia variedad de aplicaciones en ámbitos como vigilancia, defensa, rescate y reparto de productos. Sin embargo, hay una preocupación creciente sobre la seguridad en el ámbito de los UAVs: a medida que aumenta el número de aplicaciones con drones, es mayor

el riesgo de colisión con aeronaves tripuladas. Por ello, es de suma importancia disponer de un detector de objetos en vuelo para evitar posibles accidentes aéreos.

Diversos trabajos han abordado la detección y el seguimiento de UAVs utilizando una variedad de sensores, como LiDAR, radar, sensores acústicos y cámaras. Los sensores LiDAR pueden no ser eficaces para detectar UAVs pequeños a largas distancias (Benedek et al., 2021), debido, principalmente, a la baja resolución en sus medidas. Por otra parte, la utilización de los

\*Autor para correspondencia: [juan.cabreram@umh.es](mailto:juan.cabreram@umh.es)  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

sensores radar en aplicaciones civiles está, en la mayoría de países, legislada mediante una estricta normativa que limita las bandas de frecuencia y niveles de potencia con objeto de evitar las interferencias electromagnéticas con otros sistemas. Los sensores acústicos pueden utilizarse para detectar drones que no emiten ondas electromagnéticas. Sin embargo, la eficacia de estos sensores puede verse limitada por factores como el viento y el ruido de los motores y hélices (Christnacher et al., 2016), impidiendo su uso a bordo de los UAVs.

En lo relativo al empleo de cámaras se plantea el reto de estimar la posición y velocidad del UAV en un espacio 3D utilizando únicamente la información presente en las imágenes. En este sentido, las cámaras binoculares con un baseline reducido no son de aplicación al problema, debido a la falta de sensibilidad a largas distancias. La utilización de sistemas binoculares con una línea base más amplia resulta difícil de instalar en drones pequeños. Por tanto, resulta atractivo el uso de sistemas monoculares para la detección de objetos en trayectoria de colisión, debido a su reducido coste y peso. La ausencia de información sobre la profundidad resulta, sin embargo, una dificultad añadida.

Para detectar y rastrear UAVs en imágenes obtenidas por una única cámara, se pueden usar diversas técnicas. Algunas investigaciones recientes se han centrado en el uso de algoritmos de aprendizaje profundo (Hu et al., 2019; Wu et al., 2019), como es el caso de las redes neuronales convolucionales (CNN) y las redes neuronales recurrentes (RNN). Estas técnicas plantean el reconocimiento del dron en la imagen y la posterior estimación del movimiento. Sin embargo, estas técnicas se ven limitadas por el número de modelos de drones con la que se ha entrenado la red neuronal. De esta forma, la red neuronal no sería capaz de detectar nuevos tipos de aeronaves u otro tipo de objetos que pudieran ser peligrosos en vuelo. Por este motivo, en el presente trabajo se propone un método analítico para llevar a cabo una detección de objetos en vuelo basada en el movimiento aparente en la imagen cuyas principales ventajas son: (1) Se realiza una detección generalista de objetos en vuelo con independencia de su apariencia, forma, tamaño y movimiento. (2) Se obtiene una medida de posición del objeto en coordenadas de cámara (salvo un factor de escala). (3) Se efectúa una predicción sobre la colisión en vuelo, que podría ser utilizada para iniciar una maniobra de evasión. (4) No requiere ningún tipo de entrenamiento.

El resto del artículo se estructura como sigue: el apartado 2 realiza una revisión de la literatura relacionada. Después, en el apartado 3 se define el método propuesto. Seguidamente, en el apartado 4 se presenta la base de datos empleada y los resultados obtenidos para la detección de UAVs y la predicción de la colisión con estos. Finalmente, se presentan las principales conclusiones.

## 2. Estado del arte

La detección de objetos en vuelo se puede abordar mediante diferentes enfoques en función de la complejidad de la tarea a resolver. De la más fácil a la más difícil, podría clasificarse de la siguiente manera: (1) detección de un objeto en movimiento desde una cámara estática, (2) detección de un objeto estático

desde una cámara en movimiento y (3) detección de un objeto en movimiento desde una cámara en movimiento.

Por un lado, los métodos de “Background Subtraction” eliminan aquellos píxeles cuya intensidad permanece constante mediante la diferencia de imágenes consecutivas. De esta manera se destacan y detectan los objetos en movimiento. Este tipo de métodos funcionan bien únicamente cuando el fondo apenas se mueve (Piccardi, 2004), lo cual no es aplicable a la situación dada en el presente trabajo.

Otros métodos están basados en el cálculo del flujo óptico, que se define como el movimiento aparente de los píxeles causado por el movimiento relativo entre la cámara y la escena. Si se realiza el seguimiento de todos los píxeles que conforman la imagen, estamos ante un flujo óptico denso (Sepehr and Homa-youn, 2014; Agarwal et al., 2016). De otro modo, si únicamente se tienen en cuenta una serie de puntos característicos, se trataría de un flujo óptico disperso. Por ejemplo, Mori and Scherer (2013) hacen uso de descriptores SURF para obtener correspondencias entre imágenes con el fin de poder detectar objetos que se acerquen frontalmente (caso imperceptible mediante un flujo óptico denso). El método propuesto por estos autores se basa en el cambio de tamaño de los objetos a detectar, de manera que se descartan aquellos objetos cuyo tamaño permanezca invariante o disminuya y se obtienen los objetos cuya área aumenta. Además, proponen el cálculo de un tiempo hasta la colisión basado en el aumento de tamaño de la escala asociada al descriptor SURF. Otros autores emplean técnicas parecidas, empleando descriptores SURF y definiendo el área de los objetos mediante una envolvente convexa. De esta forma, se asume que ocurre una colisión cuando se detecta un cambio abrupto en el área del objeto en la imagen (Al-Kaff et al., 2017).

Los métodos basados únicamente en flujo óptico presentan ciertas limitaciones, ya que un punto en movimiento no siempre genera movimiento aparente en el plano imagen (Figura 1). En cambio, un objeto alineado con el vector  $\vec{QT}$  podría producir flujo óptico debido al cambio del tamaño aparente. Por otro lado, es necesario lidiar con el flujo óptico generado por el propio desplazamiento de la cámara (Deniz et al., 2011). En este sentido, se puede emplear el flujo óptico para modelar y cancelar el movimiento introducido por la cámara. Esto permitiría detectar todo aquello que se mueva de forma diferente (por ejemplo otro UAV). La combinación del flujo óptico denso junto con la cancelación de movimiento permite la detección de objetos móviles desde una cámara en movimiento (Kurnianggoro et al., 2016). Aunque también se puede combinar el flujo óptico disperso con la cancelación de movimiento para la detección de objetos en movimiento, como es el caso de drones monoalas en secuencias en vuelo (Li et al., 2016).

En el presente trabajo proponemos un método que combina un flujo óptico disperso y la cancelación del movimiento en la imagen debido a la cámara. Para ello, se hace uso de la matriz de homografía y un flujo óptico disperso. La calidad de las correspondencias para la generación de los vectores de flujo óptico resultará crucial para el buen desempeño del algoritmo. De esta manera presentamos un método analítico robusto para la detección de UAVs en vuelo mediante un sistema monocular.

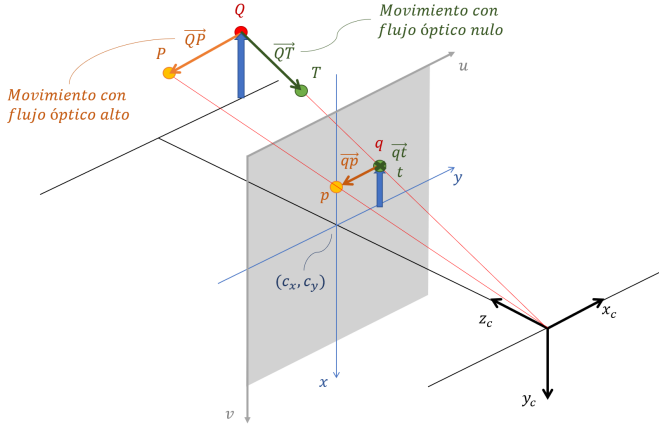


Figura 1: Esta figura muestra el modelo de cámara pinhole con el fin de demostrar que un movimiento en el espacio no siempre genera movimiento aparente en el plano imagen.

### 3. Descripción del método propuesto

En el presente trabajo proponemos un método que permite llevar a cabo una detección y seguimiento de objetos aéreos y que, además, realiza una predicción sobre la posible colisión entre los UAVs. En el apartado 3.1 se describe el método de detección y en el apartado 3.2 el método de predicción de la colisión.

#### 3.1. Método para la detección de UAVs

El método desarrollado se compone principalmente de 5 pasos, definidos a continuación:

1. Cálculo de un flujo óptico disperso en imágenes consecutivas.
2. Modelado del movimiento de los puntos anteriores mediante una matriz de homografía.
3. Predicción del movimiento de la siguiente imagen y compensación del movimiento de la imagen.
4. Filtrado espacial y temporal de los objetos detectados.
5. Segmentación de contornos cerrados.

Primero, dadas unas imágenes consecutivas  $I_t$  e  $I_{t+1}$  se calcula un flujo óptico disperso sobre una serie de puntos característicos obtenidos con el algoritmo de Shi-Tomasi. Seguidamente, sobre estos puntos, se calcula un flujo óptico disperso usando el método Kanade-Lucas. De esta manera, se cuenta con un conjunto de correspondencias entre los puntos  $p_t$  (sobre la imagen  $I_t$ ) y  $p_{t+1}$  (sobre la imagen  $I_{t+1}$ ). A continuación, modelamos el movimiento de la escena a través de una matriz de homografía  $H$ , puesto que:

$$\vec{p}_{t+1} = H \cdot \vec{p}_t \quad (1)$$

lo que nos permite estimar  $H$  a partir de una serie de correspondencias, asumiendo que los puntos se encuentran sobre un plano (en la aplicación presentada, se asume que existe un plano en la escena). El conocimiento de  $H$  nos permite predecir la siguiente imagen  $\hat{I}_{t+1}$  usando una reproyección de perspectiva.

Es importante destacar que la estimación de la matriz de homografía  $H$  es uno de los elementos más importantes del método propuesto, ya que condicionará el buen funcionamiento del

algoritmo. Para llevar a cabo el cálculo de dicha matriz se requiere disponer de, al menos, 4 puntos característicos no alineados pertenecientes a un plano en la escena que defina nuestro propio movimiento. Sin embargo, no todos los puntos calculados en el flujo óptico pertenecen a dicho plano y se requiere de un filtrado que desestime aquellos puntos que no se corresponden con el movimiento general de la escena. Para este filtrado se hace uso del algoritmo RANSAC, que de forma iterativa, estima la matriz de homografía  $H$  eliminando los datos con valores atípicos (outliers).

Una vez se ha modelado el movimiento de la escena mediante una matriz de homografía y se ha realizado la predicción de la siguiente imagen, se compensa el movimiento de la cámara de mediante el cálculo de la imagen de diferencias:

$$\Delta I_{t+1} = \hat{I}_{t+1} - I_{t+1} \quad (2)$$

Este último paso se explica en detalle en la Figura 2. Una vez se ha obtenido la imagen de diferencias  $\Delta I_{t+1}$ , se aplica a la misma un filtrado espacial compuesto de un filtrado gaussiano acompañado de un proceso de dilatación y una erosión. De esta manera se filtran pequeñas regiones de la imagen que podrían dar lugar a falsos positivos y se realiza el objeto de interés. Seguidamente, se introduce un filtrado temporal en el cual se lleva a cabo la media de  $N$  imágenes de diferencias  $\Delta \bar{I}_{t+1}$  con el propósito de filtrar aquellas zonas de la imagen donde aparece ruido de forma esporádica:

$$\Delta \bar{I}_{t+1} = \frac{1}{N} \sum_{t=1,2,3,\dots,N} \Delta I_{t+1} \quad (3)$$

Por último, la imagen de diferencias media ( $\Delta \bar{I}_{t+1}$ ), resultante de aplicar el filtro temporal, es procesada por un detector de contornos con el objetivo de detectar regiones cerradas. Se obtiene como resultado la posición del UAV en el espacio imagen y una escala estimada del objeto (área del rectángulo que engloba al contorno). Los diferentes pasos que conforman el método propuesto están ilustrados en la Figura 2.

#### 3.2. Predicción de la colisión

El problema de predicción de colisión está altamente acoplado con la detección, ya que es necesario conocer la posición y velocidad en el espacio tridimensional. Ambos, posición y velocidad están definidos en el sistema de coordenadas de cámara. Se trata, pues, de la estimación de la posición y velocidad relativas. La predicción de la colisión se divide en los siguientes pasos:

1. Cálculo del área del UAV proyectada en la imagen.
2. Cálculo de la posición del objeto en coordenadas de cámara.
3. Cálculo de la velocidad relativa.
4. Cálculo del ángulo relativo.

Conocida su posición y su área en la imagen, se puede reproyectar la posición del objeto a un espacio 3D si consideramos conocido su tamaño real en la escena:

$$z_h = f_x \frac{h}{b_h} \quad z_w = f_y \frac{w}{b_w} \quad z_c = \frac{z_w + z_h}{2} \quad (4)$$

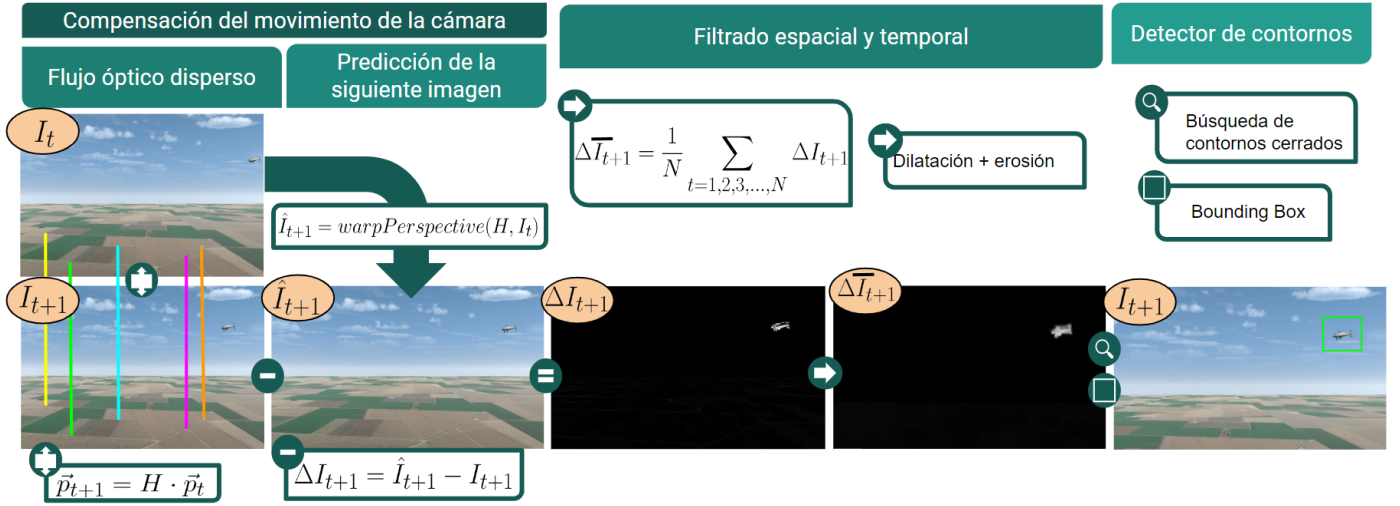


Figura 2: Pasos del método propuesto para la detección de UAVs.

$$x_c = \frac{u - c_x}{f_x} z_c \quad y_c = \frac{v - c_y}{f_y} z_c \quad (5)$$

donde  $h$  y  $w$  son la altura y anchura arbitrarias del objeto ( $m$ ),  $b_h$  y  $b_w$  definen la altura y la anchura del “bounding box” del objeto detectado en la imagen. Esto nos permite obtener una estimación de la distancia del objeto a la cámara  $z_c$  (salvo un factor de escala). Además,  $u$  y  $v$  son las coordenadas en píxeles donde se detecta el objeto y  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $c_x$  y  $c_y$  son los parámetros intrínsecos de la cámara. Finalmente, la posición del objeto en el instante  $t$  en coordenadas de cámara se escribe:  $\vec{P}_t = (x_c, y_c, z_c)_t$ .

Una vez conocida la posición del UAV  $\vec{P}_t$  respecto de la cámara en cada instante de tiempo, podemos calcular su velocidad  $\vec{V}_t$  como:

$$\vec{V}_t = \vec{P}_t - \vec{P}_{t-1} \quad (6)$$

Se trata de la velocidad relativa entre el UAV y la cámara, o lo que es lo mismo, la dirección del UAV respecto de la cámara. A continuación, para determinar si el UAV detectado está en una trayectoria de colisión, calculamos el producto escalar:

$$\vec{V}_t \cdot \vec{P}_t = |\vec{V}_t| |\vec{P}_t| \cos \theta \quad (7)$$

Cuando el vector de velocidad del UAV y su vector de posición son colineales, es posible una colisión en el aire. Por lo tanto, esta es la primera condición para detectar que el UAV colisionará con la cámara:

$$\vec{V}_t \cdot \vec{P}_t = |\vec{V}_t| |\vec{P}_t| \cos \theta = \cos \theta \approx -1 \quad (8)$$

ya que en este paso  $\vec{V}_t$  y  $\vec{P}_t$  se han normalizado, por lo tanto,  $\theta \approx \pi$ . Sin embargo, se espera una cantidad significativa de ruido en  $\vec{P}_t$  y, por lo tanto, en  $\vec{V}_t$ . Como resultado, como primera condición, solo comprobamos que  $|\cos \theta| \approx 1$ . A continuación,

la segunda condición considera una tendencia filtrada en el área del objeto a lo largo de varias imágenes. De esta manera, cuando el objeto se acerca, el “bounding box” debería crecer y viceversa. Para ello, se aproxima una función lineal de primer orden utilizando la escala estimada del objeto en cada imagen  $t$ . Como resultado, la segunda condición para predecir una colisión considera un valor positivo en la pendiente de la función.

## 4. Resultados

En este apartado se define la base de datos empleada para la comprobación del método propuesto y se presentan resultados en relación con la capacidad del método propuesto para la detección y seguimiento de objetos aéreos así como la predicción de la colisión con dichos objetos. A modo demostrativo, se incluye un ejemplo de detección y predicción de la colisión en el vídeo <sup>1</sup>.

### 4.1. Base de datos

La base de datos empleada consta de un total de 40 secuencias de vuelo obtenidas en el simulador Unity<sup>2</sup>. Estas secuencias han sido diseñadas específicamente para recrear diferentes situaciones que se pueden dar en condiciones habituales de vuelo con el fin de abordar el problema de detección y predicción de la colisión con UAVs de la forma más robusta posible. En todas ellas una aeronave transporta una cámara monocular y coincide en el espacio aéreo con otro tipo de UAV. En 16 secuencias ambas aeronaves colisionan y en 24 de estas secuencias no se produce la colisión.

Con el objetivo de probar las limitaciones de la solución propuesta se generaron 20 simulaciones donde la aeronave vuela sobre terrenos de cultivo a gran altura (estas secuencias se denominan “crop plains”). Además, se generaron otras 20 simulaciones en un entorno de montaña donde la aeronave realiza un vuelo rasante (secuencia denominada “rocky mountains”). En

<sup>1</sup><https://youtu.be/K3qm2EL1xSM>

<sup>2</sup><https://unity.com>

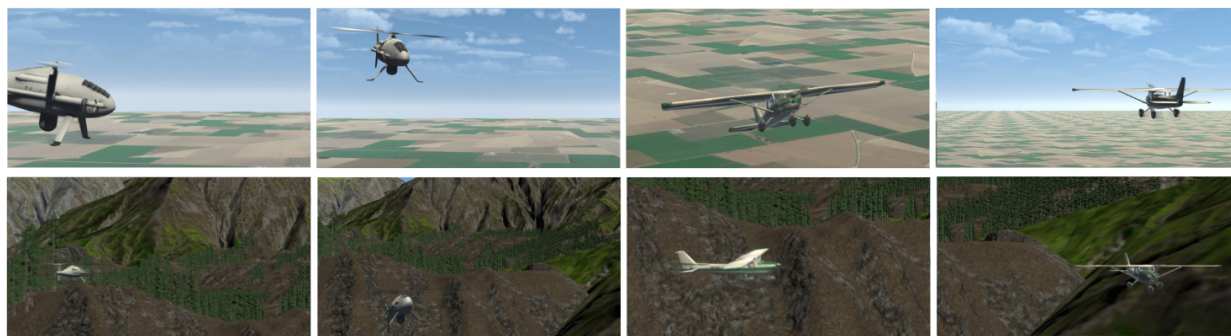


Figura 3: Ejemplos de diferentes secuencias del UAV modelo Camcopter<sup>3</sup> y Cessna<sup>4</sup> en los dos entornos de simulación (“crop plains” y “rocky mountains”).

este último entorno, el flujo óptico generado por los elementos del suelo resulta errático, por lo que constituye un desafío mayor en términos de la estimación del movimiento de la cámara y la detección del UAV en trayectoria de colisión. Por otro lado, se han simulado dos clases de UAV, un helicóptero Camcopter<sup>3</sup> y una avioneta monohélice Cessna<sup>4</sup>.

Por último, se dispone de un “ground truth” en el que se conoce la posición del UAV en el espacio 3D y su proyección al espacio imagen con el fin de evaluar los resultados de detección y predicción de la colisión. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestran algunas instantáneas extraídas de diferentes secuencias de simulación.

#### 4.2. Resultados del método de detección

En este apartado se evalúa la bondad del algoritmo propuesto para desempeñar la tarea de detección y seguimiento descrita en el apartado 3.1. Para ello, se han calculado resultados en términos de “precision” y “recall” para las 20 secuencias de vuelo que conforman la base de datos (véase la Tabla 1). Con el objetivo de obtener dichas medidas, se han considerado los verdaderos positivos, falsos positivos, verdaderos negativos y falsos negativos de cada uno de las imágenes que conforman las diferentes secuencias.

En la Tabla 1 se puede apreciar que los resultados obtenidos para el entorno de terrenos de cultivo resultan muy correctos, obteniéndose valores de “precision” y “recall” cercanos a 1. Si se analizan en detalle los resultados obtenidos para el entorno de montaña, el número de falsos positivos aumenta, decreciendo así la precisión en la detección. Cabe remarcar que, en muchos casos, los falsos positivos son debidos a la detección de árboles y superficies rocosas cercanas a la cámara y cuya detección podría considerarse correcta, pues constituyen un peligro alto para la navegación de la aeronave.

Por otro lado, en todas las secuencias se observan valores altos de “recall”, con lo que podemos concluir que el algoritmo propuesto no produce falsos negativos. Es importante mencionar que los falsos negativos son altamente indeseables en un sistema de detección de UAVs en vuelo.

#### 4.3. Resultados obtenidos en la predicción de colisiones

Seguidamente, se evalúa de forma cuantitativa el método propuesto para llevar a cabo la predicción de la colisión (apar-

tado 3.2). Para ello, se ha calculado la ratio entre el número de imágenes en las que se predice la colisión y el número total de imágenes que conforman una secuencia. Este factor se denomina “ratio de predicción global”,  $R_G$ . Esta ratio se debe comparar, en cada caso, con el resultado esperado (1: si existe colisión en la secuencia, 0: no existe colisión en la secuencia). Por otra parte, se observa en el conjunto de secuencias que, generalmente, el tamaño del objeto a detectar es muy pequeño en las primeras imágenes de la secuencia. Esto justifica la definición de una ratio de predicción que considere únicamente los últimos instantes antes de la posible colisión. Por tanto, se calcula la “ratio de predicción de 8 s”,  $R_8$ , también, en los últimos 8 segundos de cada secuencia.

En la Tabla 2 se muestran los resultados para cada una de las secuencias que conforman la base de datos utilizada. Observando los resultados, se puede apreciar que, de forma general, la predicción de la colisión es satisfactoria en todas las secuencias. Cabe destacar el buen desempeño del algoritmo para ambos entornos, y en concreto, para los últimos 8 segundos de simulación antes de la posible colisión. Este tiempo se considera suficiente para que el UAV inicie alguna maniobra de evasión.

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

En este artículo se ha presentado una técnica para detectar UAVs en vuelo mediante una única cámara y predecir si existe riesgo de colisión. El método está basado en el cálculo de un flujo óptico disperso que permite calcular una matriz de homografía y compensar el movimiento de la cámara. Finalmente, se predice una posible colisión analizando la colinealidad existente entre el vector posición del UAV con su vector velocidad. Se han presentado resultados en simulación en términos de detección, seguimiento y predicción de la colisión entre UAVs. Los resultados obtenidos han sido altamente satisfactorios, puesto que en la gran mayoría de los casos se detecta y se predice la colisión con el UAV con la suficiente antelación como para esquivarlo en caso de que se encuentre en trayectoria de colisión.

Al evaluar el método de detección, se ha encontrado una tendencia a predecir un mayor número de falsos positivos que de falsos negativos. Este hecho se considera beneficioso, pues se considera que un falso negativo tiene una repercusión muy grave en relación con la seguridad de vuelo de estas aeronaves.

<sup>3</sup><https://schiebel.net/products/camcopter-s-100/>

<sup>4</sup><https://cessna.txtav.com>

El número de falsos positivos se ha visto incrementado especialmente en el entorno montañoso, donde la aeronave vuela a baja altura. En este caso, no sólo se detectaba el UAV, sino también aquellos elementos de la escena más cercanos que pueden suponer un peligro en la navegación.

En relación con el método de predicción de la colisión, cabe destacar que, aunque no se conozca la profundidad a la que se encuentra al UAV, sí que se puede estimar con precisión su dirección. De esta forma es posible estimar de forma fiable si el dron se encuentra en trayectoria de colisión. Por otro lado, la capacidad de predecir si el UAV está en trayectoria de colisión no implica que seamos capaces de conocer cuándo se producirá ese impacto. Esta capacidad se plantea como una extensión futura del presente trabajo que implicaría el reconocimiento del objeto y de su tamaño real en la escena. En los resultados mostrados, se obtiene que, en todas las secuencias en trayectoria de colisión el algoritmo ha sido capaz de emitir una alerta con una antelación de 8 segundos, tiempo suficiente para realizar un procedimiento de evasión.

En cuanto a trabajos futuros, la información obtenida por el método propuesto resulta de interés para integrarla en sistemas de “sense and avoid”. Para ello, habría que incorporar un método de planificación de trayectorias con el fin de eludir la colisión.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la empresa Abionica Solutions S.L.P. al amparo del contrato: “Empleo de algoritmos para conciencia situacional en vuelo mediante visión artificial”, ABIONICA1.21T. Además, esta publicación forma parte del proyecto TED2021-130901B-I00, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “Next-GenerationE”/PRTR” y del proyecto PROMETEO/2021/075 financiado por la Generalitat Valenciana.

Tabla 1: Resultados de “precision” y “recall” (en tanto por uno) para cada una de las secuencias que conforman el conjunto de datos (véase el apartado 4.1).

Detección de UAVs					
Modelo de UAV		Cessna		Camcopter	
Entorno	Sec.	Precision	Recall	Precision	Recall
Crop plains	1	0.99	1.00	1.00	1.00
	2	0.99	1.00	1.00	1.00
	3	1.00	1.00	1.00	1.00
	4	1.00	1.00	1.00	0.77
	5	1.00	1.00	1.00	0.77
	6	1.00	0.99	1.00	1.00
	7	1.00	0.96	1.00	0.68
	8	1.00	1.00	1.00	0.92
	9	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.00	1.00	1.00	1.00
Rocky mountains	1	0.78	1.00	0.82	1.00
	2	0.84	1.00	0.83	1.00
	3	0.76	1.00	0.76	1.00
	4	0.84	1.00	0.83	1.00
	5	0.87	1.00	0.84	1.00
	6	0.94	1.00	0.86	1.00
	7	0.93	1.00	0.90	1.00
	8	0.89	1.00	0.72	1.00
	9	0.27	1.00	0.65	1.00
	10	0.71	1.00	0.70	1.00

Tabla 2: Resultados de predicción de la colisión (sobre 1). Esta evaluación se ha realizado teniendo en consideración las diferentes secuencias de manera completa y en los últimos 8 segundos. Resultado esperado: “0” si no colisiona y “1” si colisiona).

Predicción de la colisión						
UAV		Cessna		Camcopter		Res. esperado
Entorno	Sec.	$R_G$	$R_8$	$R_G$	$R_8$	
Crop plains	1	0.28	0.11	0.24	0.06	0
	2	0.45	0.41	0.34	0.30	0
	3	0.80	0.81	0.96	0.96	1
	4	0.80	0.80	0.71	0.93	1
	5	0.88	0.89	0.68	0.88	1
	6	0.03	0.05	0.12	0.00	0
	7	0.12	0.08	0.09	0.00	0
	8	0.52	0.53	0.84	1.00	1
	9	0.00	0.00	0.37	0.37	0
	10	0.40	0.40	0.03	0.03	0
Rocky mountains	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0
	2	0.45	0.42	0.02	0.02	0
	3	0.96	0.97	0.79	0.79	1
	4	0.55	0.55	0.70	0.70	1
	5	0.78	0.79	0.67	0.67	1
	6	0.13	0.07	0.10	0.15	0
	7	0.08	0.00	0.09	0.00	0
	8	0.44	0.51	0.51	0.59	1
	9	0.29	0.29	0.54	0.54	0
	10	0.49	0.49	0.09	0.09	0

## Referencias

- Agarwal, A., Gupta, S., Singh, D. K., 2016. Review of optical flow technique for moving object detection. In: 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I). pp. 409–413.
- Al-Kaff, A., García, F., Martín, D., De La Escalera, A., Armingol, J. M., 2017. Obstacle detection and avoidance system based on monocular camera and size expansion algorithm for UAVs. *Sensors* 17 (5).
- Benedek, C., Majdik, A., Nagy, B., Rozsa, Z., Sziranyi, T., 2021. Positioning and perception in lidar point clouds. *Digital Signal Processing* 119, 103193.
- Christnacher, F., Hengy, S., Laurenzis, M., Matwyschuk, A., Naz, P., Schertzer, S., Schmitt, G., 2016. Optical and acoustical uav detection. In: *Security + Defence*.
- Deniz, O., Bueno, G., Bermejo, E., Sukthankar, R., 2011. Fast and accurate global motion compensation. *Pattern Recognition* 44 (12), 2887–2901.
- Hu, Y., Wu, X., Zheng, G., Liu, X., 2019. Object detection of uav for anti-uav based on improved yolo v3. In: 2019 Chinese Control Conference (CCC). pp. 8386–8390.
- Kurnianggoro, L., Shahbaz, A., Jo, K.-H., 2016. Dense optical flow in stabilized scenes for moving object detection from a moving camera. In: 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). pp. 704–708.
- Li, J., Ye, D. H., Chung, T., Kolsch, M., Wachs, J., Bouman, C., 2016. Multi-target detection and tracking from a single camera in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 4992–4997.
- Mori, T., Scherer, S., 2013. First results in detecting and avoiding frontal obstacles from a monocular camera for micro unmanned aerial vehicles. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1750–1757.
- Piccardi, M., 2004. Background subtraction techniques: a review. In: 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583). Vol. 4. pp. 3099–3104 vol.4.
- Sepehr, A., Homayoun, M. N., 2014. Optical flow based moving object detection and tracking for traffic surveillance. In: *International Conference on E-Business and E-Government*.
- Wu, Z., Suresh, K., Narayanan, P., Xu, H., Kwon, H., Wang, Z., October 2019. Delving into robust object detection from unmanned aerial vehicles: A deep nuisance disentanglement approach. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*.