

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

Gijón · Palacio de Congresos · 6, 7 y 8 de Septiembre de 2017



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
*Comité Español
de Automática*

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo
Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias)
Tel. 985 10 95 03 Fax 985 10 95 07
[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)
servipub@uniovi.es

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo y soporte, sin la preceptiva autorización.

Prefacio

Las *Jornadas de Automática* se celebran desde hace **40 años** en una universidad nacional facilitando el encuentro entre expertos en esta área en un foro que permite la puesta en común de las nuevas ideas y proyectos en desarrollo. Al mismo tiempo, propician la siempre necesaria colaboración entre investigadores del ámbito de la Ingeniería de Control y Automática, así como de campos afines, a la hora de abordar complejos proyectos de investigación multidisciplinares.

En esta ocasión, las Jornadas estarán organizadas por la Universidad de Oviedo y se han celebrado del 6 al 8 de septiembre de 2017 en el Palacio de Congresos de Gijón, colaborando tanto la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI) como el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y de Sistemas del que depende el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Además de las habituales actividades científicas y culturales, esta edición es muy especial al celebrarse el **50 aniversario de la creación de CEA**, Comité Español de Automática. Igualmente este año se conmemora el 60 aniversario de la Federación Internacional del Control Automático de la que depende CEA. Así se ha llevado a cabo la presentación del libro que se ha realizado bajo la coordinación de D. Sebastián Dormido, sobre la historia de la Automática en España en una sesión en la que han participado todos los ex-presidentes de CEA conjuntamente con el actual, D. Joseba Quevedo.

Igualmente hemos contado con la presencia de conferenciantes de prestigio para las sesiones plenarias, comunicaciones y ponencias orales en las reuniones de los 9 grupos temáticos, contribuciones en formato póster. Se ha celebrado también el concurso de CEABOT, así como una nueva Competición de Drones, con el ánimo de involucrar a más estudiantes de últimos cursos de Grado/Máster.

En el marco de las actividades culturales programadas se ha podido efectuar un recorrido en el casco antiguo situado en torno al Cerro de Santa Catalina y visitar la Laboral.

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

Antonio Agudo	Institut de Robòtica i Informàtica Industrial
Rosa M Aguilar	University of La Laguna.
Luciano Alonso	University of Cantabria
Ignacio Álvarez García	Universidad de Oviedo
Antonio Javier Artuñedo García	Centre for Automation and Robotics (CSIC-UPM)
José M. Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Pedro Balaguer	Universitat Jaume I
Antonio Javier Barragán Piña	Universidad de Huelva
Alfonso Baños	Universidad de Murcia
Guillermo Bejarano	University of Seville
Gerardo Beruvides	Centro de Automática y Robótica
Carlos Bordons	University of Seville
Jose Manuel Bravo	University of Huelva
Jose Luis Calvo-Rolle	University of A Coruña
Fernando Castaño Romero	Centro de Automática y Robótica (UPM -CSIC)
José Luis Casteleiro-Roca	University of Coruña
Alvaro Castro-Gonzalez	Universidad Carlos III de Madrid
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Abel A. Cuadrado	University of Oviedo
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
Emma Delgado	Universidad de Vigo
Jose-Luis Diez	Universitat Politecnica de Valencia
Manuel Domínguez	Universidad de León
Juan Manuel Escaño	Universidad de Sevilla
Mario Francisco	University of Salamanca
Maria Jesus Fuente	Universidad de Valladolid
Juan Garrido	Universtiy of Cordoba
Antonio Giménez	Universidad de Almeria
Evelio Gonzalez	Universidad de La Laguna
José-Luis Guzmán	Universidad de Almería
Rodolfo Haber	Center for Automation and Robotics (UPM-CSIC)
César Ernesto Hernández	Universidad de Almería
Eloy Irigoyen	UPV/EHU
Agustin Jimenez	Universidad PolitÁcnica de Madrid
Emilio Jiménez	University of La Rioja
Jesus Lozano	Universidad de Extremadura
Jorge Luis Madrid	Centro de Automática y Robótica
Luis Magdalena	Universidad Politécnic de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
Miguel Ángel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia
Beltrán de La Cita, Jorge
Bermudez-Cameo, Jesus
Blanco-Claraco, Jose-Luis
Blanes, Francisco
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar
Gimenez, Antonio
Gruber, Patrick
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul
Marín Plaza, Pablo
Mañanas, Miguel Angel
Morales, Rafael
Moreno, Francisco-Angel

Núñez, Luis Ramón

Ponz Vila, Aurelio
Posadas-Yague, Juan-Luis
Poza-Luján, Jose-Luis
Pumarola, Albert

Raya, Rafael
Revestido Herrero, Elías
Rocon, Eduardo
Ruiz Sarmiento, José Raúl
Ruiz, Adria

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobioreactor raceway	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarréño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> Automar <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

Exploración y Reconstrucción 3D de Fondos Marinos Mediante AUVs y Sensores Acústicos	218
<i>Oscar L. Manrique Garcia, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL	226
<i>Marina Pérez de La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro, Rafael Morales Herrera and Eva Segura</i>	
MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS	232
<i>Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Peñalver, David Fornas and Diego Centelles</i>	
<hr/> Bioingeniería <hr/>	
MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA	238
<i>Eliana Aguilar, Oscar Andres Vivas and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar	244
<i>Cristina Bayón, Teresa Martín-Lorenzo, Beatriz Moral-Saiz, Óscar Ramírez, Álvaro Pérez-Somarriba, Sergio Lerma-Lara, Ignacio Martínez and Eduardo Rocon</i>	
PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA	251
<i>Arturo Bertomeu-Motos, Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Luis Daniel Lledó, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS.....	256
<i>Carlos Castedo Hernández, Rafael Estop Remacha, Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos Del Blanco</i>	
Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements.....	264
<i>Alejandro Clemotte, Miguel A. Velasco and Eduardo Rocon</i>	
Diseño de un sensor óptico de fuerza para exoesqueletos de mano.....	270
<i>Jorge Diez Pomares, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalan Orts, Francisco Javier Badesa Clemente, José María Sabater and Nicolas Garcia Aracil</i>	
POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG	276
<i>Josep Dinarès-Ferran, Christoph Guger and Jordi Solé-Casals</i>	
EFFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI.....	282
<i>Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Arturo Bertomeu-Motos, Luisa Lorente, Nuria Requena, Irene Delegido, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive.....	288
<i>Andres Hidalgo Romero and Eduardo Rocon</i>	

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG)	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG	328
<i>Marisol Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/> Control Inteligente <hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote.	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluze, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> Educación en Automática <hr/>	
REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL	445
<i>Ignacio Díaz Blanco, Alvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Alvarez and Hilario López García</i>	
Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos	451
<i>Juan M. Gandarias, Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA	457
<i>Julio Garrido Campos, David Santos Esterán, Juan Sáez López and José Ignacio Armesto Quiroga</i>	
Construcción y modelado de un prototipo fan & plate para prácticas de control automático	465
<i>Cristina Lampon, Javier Martin, Ramon Costa-Castelló and Muppaneni Lokesh Chowdary</i>	

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruíz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA.	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO	563
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez and Cesar De Prada</i>	
A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios	569
<i>Miquel Àngel Piera Eroles, Julia de Homdedeu, Maria Del Mar Tous, Thimjo Koca and Marko Radanovic</i>	
ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK	575
<i>José Luis Pitarch, Marc Kalliski, Carlos Gómez Palacín, Christian Jasch and Cesar De Prada</i>	
Predicción de la irradiancia a partir de datos de satélite mediante deep learning	582
<i>Javier Pérez, Jorge Segarra-Tamarit, Hector Beltran, Carlos Ariño, José Carlos Alfonso Gil, Aleks Attanasio and Emilio Pérez</i>	
MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA	589
<i>Gabriel Pérez Rodríguez and Fernando Morilla</i>	
Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos	596
<i>Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha</i>	
DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO	604
<i>Pedro Santos, Jose Luis Pitarch and César de Prada</i>	
DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS	611
<i>Jorge Segarra-Tamarit, Emilio Pérez, Hector Beltran, Enrique Belenguer and José Luis Gandía</i>	
Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras	618
<i>Alejandro Tapia Córdoba, Pablo Millán Gata, Fabio Gómez-Estern Aguilar, Carmelina Ierardi and Álvaro Rodríguez Del Nozal</i>	
FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS	626
<i>J.M Torres, R.M. Aguilar, C.A. Martin and S. Diaz</i>	
SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACION AUTONOMA	633
<i>José Emilio Traver, Juan Francisco Ortega Morán, Ines Tejado, J. Blas Pagador, Fei Sun, Raquel Pérez-Aloe, Blas M. Vinagre and F. Miguel Sánchez Margallo</i>	
PLANIFICACION DE LA PRODUCCION BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES	641
<i>Manuel Jesús Vasallo Vázquez, José Manuel Bravo Caro, Emilian Cojocarú and Manuel Emilio Gegundez Arias</i>	
Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía	649
<i>Ascensión Zafra Cabeza, Rafael Espinosa, Miguel Àngel Ridao Carlini and Carlos Bordóns Alba</i>	
Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab	657
<i>Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya, Àlvaro Castro-Gonzalez, Juan José Gamboa, Marcos Maroto Gómez, Sara Marqués Villaroya, Antonio J. Pérez Vidal and Miguel Àngel Salichs</i>	

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO	664
<i>Marta Ayats and Raul Suarez</i>	
COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS	672
<i>Brayan Bermudez, Kristel Novoa and Miguel Valbuena</i>	
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS	680
<i>Andrea Blanco Ivorra, Jorge Diez Pomares, David Lopez Perez, Francisco Javier Badesa Clemente, Miguel Ignacio Sanchez and Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo	686
<i>Raúl Cebolla Arroyo, Jorge De Leon Rivas and Antonio Barrientos</i>	
USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR	694
<i>Josep Arnau Claret and Luis Basañez</i>	
Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate	701
<i>Jorge De León Rivas and Antonio Barrientos</i>	
SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL	709
<i>Mario Domínguez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo and Samuel Marcos Pablos</i>	
Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos	717
<i>David Fernández Chaves, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales	724
<i>Juan José Gamboa, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo, Marcos Maroto Gómez and Miguel A. Salichs</i>	
Clasificación de información táctil para la detección de personas	732
<i>Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-De-Gabriel and Alfonso García-Cerezo</i>	
Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT	738
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS	746
<i>Daniel González, Lluís Ros and Federico Thomas</i>	
TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS	754
<i>Ana Gómez Delgado, Carlos Perez-Del-Pulgar, Antonio Reina Terol and Victor Muñoz Martinez</i>	
CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION	760
<i>Juan Hernández Vicén, Santiago Martínez de La Casa Díaz and Carlos Balaguer</i>	
PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO	766
<i>Carlos G. Juan, Jose Maria Vicente, Alvaro Garcia and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	

Estimadores de fuerza y movimiento para el control de un robot de rehabilitación de extremidad superior.....	772
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Asier Brull</i>	
Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste	780
<i>Marcos Maroto Gómez, José Carlos Castillo, Fernando Alonso-Martín, Juan José Gamboa, Sara Marqués Villarroya and Miguel Ángel Salichs</i>	
Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot	787
<i>Sara Marqués Villarroya, Jose Carlos Castillo Montoya, Fernando Alonso Martín, Marcos Maroto Gómez, Juan José Gamboa and Miguel A. Salichs</i>	
HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO	793
<i>Hector Montes, Roemi Fernandez, Pablo Gonzalez de Santos and Manuel Armada</i>	
Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos	799
<i>Antonio José Muñoz-Ramírez, Jesús Manuel Luque-Bedmar, Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Anthony Mandow, Javier Serón and Alfonso Garcia-Cerezo</i>	
SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS	806
<i>Cándido Otero Moreira, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz Dominguez, Joaquín López Fernández, Rafael Barea, Eduardo Romera, Eduardo Molinos, Roberto Arroyo, Luís Miguel Bergasa and Elena López</i>	
Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica.....	814
<i>Francisco Pastor, Juan M. Gandarias and Jesús M. Gómez-De-Gabriel</i>	
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....	821
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL	829
<i>Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio and Antonio Barrientos</i>	
Evolución de la robótica social y nuevas tendencias.....	836
<i>Antonio J. Pérez Vidal, Alvaro Castro-Gonzalez, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya and Miguel A. Salichs</i>	
DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO	844
<i>Irene Rivas-Blanco, M Carmen López-Casado, Carlos Pérez-Del-Pulgar, Francisco García-Vacas, Víctor Fernando Muñoz, Enrique Bauzano and Juan Carlos Fraile</i>	
CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....	852
<i>Francisco Abiud Rojas-De-Silva and Raul Suarez</i>	
Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos.....	860
<i>José Raúl Ruiz Sarmiento, Cipriano Galindo and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento	868
<i>Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES	876
<i>Alejandro Suarez, Guillermo Heredia and Anibal Ollero</i>	
EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS	864
<i>David Vargas Frutos, Juan Carlos Ramos Martínez, José Luis Samper Escudero, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre Pérez</i>	

Sistemas de Tiempo Real

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET....	892
<i>María Luz Alvarez Gutierrez, Isabel Sarachaga Gonzalez, Arantzazu Burgos Fernandez, Nagore Iriondo Urbistazu and Marga Marcos Muñoz</i>	
CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA	900
<i>Francisco Blanes Noguera and Andrés Benlloch Faus</i>	
Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta	906
<i>Alfons Crespo, Patricia Balbastre, Jose Simo and Javier Coronel</i>	
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES	913
<i>Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernandez and Marga Marcos</i>	
DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta	921
<i>Hector Perez and J. Javier Gutiérrez</i>	
ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR	929
<i>Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yaguë, Giovanni-Javier Tipantuña-Topanta, Francisco Abad and Ramón Mollá</i>	
Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles	935
<i>Rafael Priego, Elisabet Estévez, Darío Orive, Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido	942
<i>Jose Simo, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë and Francisco Blanes</i>	

Visión por Computador

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes	948
<i>Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos, Arturo de La Escalera and José María Armingol Moreno</i>	
ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES	956
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Sergio Cebollada and Oscar Reinoso</i>	
Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopletismográfica.....	964
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres, Jordan Ortega Rodríguez, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides	970
<i>Juan Miguel Garcia Haro and Santiago Martinez de La Casa</i>	

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES	976
<i>Natalia García Del Prado, Victor Gonzalez Castro, Enrique Alegre and Eduardo Fidalgo Fernández</i>	
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL	983
<i>Manuel Ibarra-Arenado, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla-Gómez and Juan Pérez-Oria</i>	
Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks	991
<i>Iván De Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez and Wesam Al Nabki</i>	
Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador ..	999
<i>Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de La Escalera and Jose Maria Armingol</i>	
T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS	1007
<i>Tomás Prado, Blanca Quintana, Samuel A. Prieto and Antonio Adan</i>	
EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS	1015
<i>Pablo Rubio, Eduardo Fidalgo, Enrique Alegre and Víctor González</i>	
SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS .	1023
<i>Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Ines Tejado and Blas M. Vinagre</i>	
Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil	1031
<i>David Zúñiga-Nöel, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno and Javier González Jiménez</i>	

Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C

Mario de la Rosa

Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, mardeltri@gmail.com

Antonio J. Gallego

Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, antgallen@gmail.com

Eduardo F. Camacho

Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, efcamacho@us.es

Resumen

Es bien conocido que las maniobras de aterrizaje y despegue son las más complejas del vuelo de las aeronaves. En efecto, un gran porcentaje de los accidentes aéreos se da en la ejecución de estas operaciones. Si además se tiene en cuenta que la mayoría de estos accidentes se deben a errores humanos, es evidente la necesidad de un control automático que garantice la correcta ejecución de estas fases de vuelo. En este artículo se plantea una estrategia de aterrizaje sencilla y eficaz que hace uso de una estructura jerárquica de controladores PID. Para modelar la dinámica de la aeronave se empleará FlightGear, que es un simulador de vuelo de código abierto que ofrece un alto grado de realismo. El sistema de control de vuelo (Flight Control System, FCS) se incluye en un programa en C que se comunica con FlightGear mediante sockets UDP. Para llevar a cabo esta maniobra se ha desarrollado un sistema de guiado que se encarga de enviar las consignas a los controles implementados. Finalmente, cabe destacar que el aterrizaje se realizará en el aeropuerto de Sevilla con una Cessna 172P.

Palabras clave: Controlador PID, Aterrizaje automático, FlightGear, Matlab, Simulink, Simulación en tiempo real

1 INTRODUCCIÓN

La correcta ejecución de las maniobras de aterrizaje y despegue es clave tanto en la aviación comercial como en la general. Según se indica en [2] el 12 % de los accidentes de aviones comerciales se dan en las maniobras de aterrizaje y ascenso inicial, mientras que el 49 % se dan en la aproximación final y el aterrizaje. Con estas cifras queda de manifiesto la necesidad del desarrollo de controles automáticos para garantizar la seguridad en estas fases de vuelo.

En la literatura se exponen estrategias de control cuyo desarrollo depende de los parámetros con los que se modelan la aeronave. Como ejemplo de estos algoritmos se tiene [3], que usa un control de seguimiento de modelo y control H_∞ para el control de una aeronave durante el aterrizaje. En este caso se emplea el simulador de vuelo X-Plane conectado con Matlab. De forma análoga, en [5] se expone un sistema de control de aterrizaje basado en inversión de la dinámica y control H_∞ . Finalmente en [1] se comparan tres controladores basados en el espacio de estados (MPC, LQR y LQR con planificación de ganancias), además en este artículo se trata cómo realizar la comunicación entre Matlab y FlightGear.

En este artículo se propone una estrategia de control jerárquico basada en PID y aplicada a una avioneta modelada en FlightGear. Se asume que este programa es una caja negra para el programa de control, tal y como lo sería un avión real. Esta estrategia se beneficia del alto grado de realismo proporcionado por FlightGear que usa modelos de la dinámica del vuelo realistas y altamente consolidados. Se trata de ecuaciones del movimiento no lineales junto con modelos aerodinámicos complejos.

El artículo comienza presentando una descripción de FlightGear en la sección 2. A continuación, la sección 3 incluye una descripción del sistema de guiado empleado para la generación de referencias que recibe el sistema de control, cuya estructura se detalla en la sección 4. Con el fin de validar las metodologías seguidas, la sección 5 presenta los resultados del vuelo de aterrizaje en FlightGear. Finalmente, en la sección 6 se exponen las conclusiones obtenidas.

2 MODELO FLIGHTGEAR

Este artículo usa FlightGear no solo como una herramienta de visualización sino también como una herramienta de modelado. FlightGear es un sim-

ulador de vuelo sofisticado, gratuito y completamente de código abierto. Este programa contiene una gran variedad de modelos de aeronaves como son: planeadores, helicópteros, cazas y aviones comerciales.

Actualmente FlightGear usa dos modelos de la dinámica del vuelo: JSBSIM y YAsim. Así mismo, se utiliza un modelo de terreno, TerraGear, y también se incluyen efectos atmosféricos.

JSBSIM emplea la ecuación de Newton para obtener la aceleración del centro de gravedad de la aeronave con respecto un sistema fijo a Tierra y con origen en el centro de la misma (Earth Centered Earth Fixed, ECEF):

$${}^b\dot{\mathbf{v}}_{CM/e} = \mathbf{F}_{A,T}/m - (\omega_{b/e} + 2\omega_{e/i}) \times \mathbf{v}_{CM/e}^b \quad (1)$$

donde ${}^b\dot{\mathbf{v}}_{CM/e}$ es la derivada respecto a los ejes cuerpos de la velocidad del centro de masas respecto a los ejes ECEF, $\mathbf{F}_{A,T}^b$ es el conjunto de fuerzas aerodinámicas y propulsivas en ejes cuerpo, m es la masa de la aeronave, $\omega_{b/e}^b$ es la velocidad angular de los ejes cuerpo respecto a los ECEF expresada en ejes cuerpo, $\omega_{e/i}$ es la velocidad angular de los ejes ECEF con respecto a los inerciales expresada en ejes cuerpo, y $\mathbf{v}_{CM/e}^b$ es la velocidad del centro de masas respecto al sistema ECEF expresado en ejes cuerpo

La aceleración angular del sistema ejes cuerpo con respecto a los ejes inerciales viene dada por la siguiente relación:

$${}^b\dot{\omega}_{b/i} = (J^b)^{-1} [\mathbf{M}_{A,T}^b - \omega_{b/i}^b \times J^b \omega_{b/i}^b] \quad (2)$$

donde ${}^b\dot{\omega}_{b/i}$ es la derivada respecto a los ejes cuerpo de la velocidad angular de los ejes cuerpo respecto a los ejes inerciales, J^b es la matriz de inercia expresada en ejes cuerpo, y $\mathbf{M}_{A,T}^b$ son los momentos aerodinámicos y propulsivos en ejes cuerpo.

Se puede encontrar más información sobre el modelo en [9] o en [8].

3 SISTEMA DE GUIADO

El sistema de guiado de la aeronave es el encargado de establecer las consignas recibidas por los controladores. En la figura 1 se muestra esquemáticamente cuales son las entradas y salidas de dicho sistema. Se reciben dos entradas: la posición actual de la aeronave, que se actualiza continuamente, y los *waypoints* de paso, que pueden definirse tanto *online*, como *offline*, en este caso se empleará una planificación estratégica.

En primer lugar, en la sección 3.1, se establecerán los puntos de referencia y las consignas necesarias

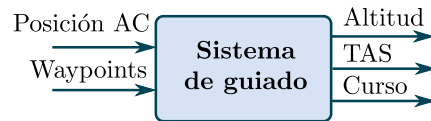


Figura 1: Sistema de guiado

para poder realizar un aterrizaje en el aeropuerto de Sevilla. Una vez definida la trayectoria, es necesario implementar un mecanismo de guiado que seleccione automáticamente el punto objetivo. El funcionamiento del mismo se tratará en detalle en la sección 3.2.

3.1 Trayectoria de aproximación

La trayectoria de aproximación se definirá a partir de una serie de puntos de paso, *waypoints*, que quedan definidos por su latitud, longitud y altitud. Además, a cada uno de ellos se le ha asociado una velocidad, que será la velocidad de referencia desde dicho punto hasta el siguiente. Ver figuras Cabe destacar que las trayectorias de aproximación de los aeropuertos españoles están establecidas por ENAIRE. Dependiendo del sistema disponible para realizar la aproximación existen diferentes rutas a seguir. Por ejemplo, si se utilizase ILS (Instrumental Landing System), la trayectoria vertical a seguir sería la mostrada en la figura 2 [4]. Sin embargo, en este artículo, se realizará una aproximación visual, lo cual permitirá definir la trayectoria libremente. De esta forma se podrá mostrar el funcionamiento de los distintos controladores, haciendo así el aterrizaje más atractivo desde el punto de vista del control.

Punto	Latitud[°]	Longitud[°]
Posición inicial	37.426564	-6.014983
FAF	37.4175	-5.9925
Punto A	37.417663	-5.954661
Punto B	37.417839	-5.914728
Pista	37.417991	-5.887864

Tabla 1: Lista de waypoints (latitud y longitud)

Punto	Altitud[ft]	Velocidad[knot]
Posición inicial	1000	85
FAF	1000	85
Punto A	700	80
Punto B	250	70
Pista	80	60

Tabla 2: Lista de waypoints (altitud y velocidad)

En la figura 4 se muestra el perfil de descenso que se ha establecido. Inicialmente el avión se encuentra en el punto “posición inicial” a una altitud de 1000 ft con una velocidad de 85 knot, desde aquí

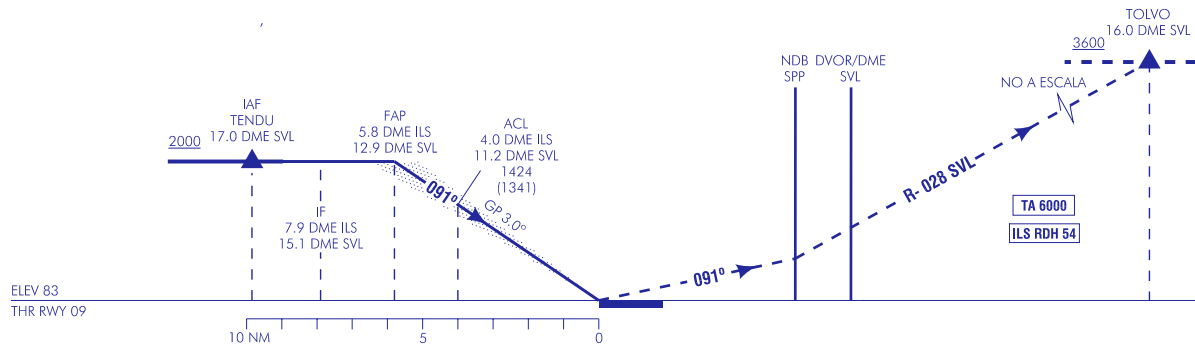


Figura 2: Senda de aproximación con ILS



Figura 3: Puntos de paso proyectados

se dirigirá al FAF (Final Approach Fix) a una altitud de 1000 ft y una velocidad de 85 knot. El siguiente punto objetivo será el punto A, al cual se acercará a una altitud de 700 ft y una velocidad de 85 knot. Una vez alcance este punto se dirigirá al punto B a una altitud de 250ft y una velocidad de 70 knot. En el punto B cambiará el control de la velocidad aerodinámica, a partir de este momento la velocidad aerodinámica se controlará con el cabeceo y se impondrá la posición de palanca.

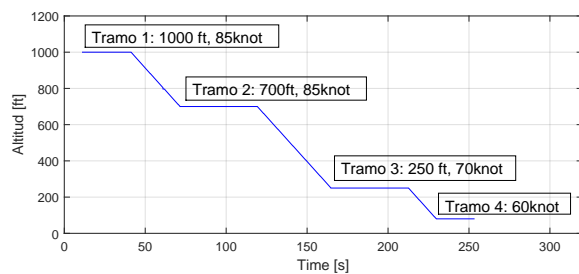


Figura 4: Perfil de descenso

3.2 MECANISMO DE GUIADO

En esta sección se definirá el algoritmo de guiado empleado, es decir, cómo se determinan las consignas a partir de la lista de waypoints y la posición de la aeronave.

3.2.1 Selector de waypoints

El selector de waypoints será el encargado de seleccionar el waypoint objetivo. Para ello se calcula la distancia hacia el punto siguiente y cuando la misma es menor de 500 m, se selecciona el siguiente waypoint de la lista. La distancia se ha calculado como se indica a continuación:

$$d_{wp} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

siendo

$$x = R_{mer}(\phi_{AC} - \phi_{wp}) \quad (4)$$

$$y = R_{norm} \cos(\phi_{wp})(\lambda_{AC} - \lambda_{wp}) \quad (5)$$

donde R_{mer} es el radio de curvatura del meridiano, R_{norm} el radio de curvatura normal, ϕ_{AC} y λ_{AC} son la latitud y longitud de la aeronave (aircraft) y ϕ_{wp} y λ_{wp} son la latitud y longitud del waypoint de destino. R_{mer} y R_{norm} son los radios de curvatura a lo largo de líneas de latitud y longitud constantes respectivamente. Las ecuaciones para su cálculo se pueden consultar en el capítulo 4, sección 4.1 de [7].

Una vez seleccionado el waypoint se tendrán las coordenadas del punto objetivo, la altura y la velocidad aerodinámica de referencia.

Por último cabe destacar que esta referencia de altitud no es la que recibe directamente el controlador. Esto se debe a que la tasa de variación de la referencia está limitada con el objetivo de conseguir una respuesta del controlador más suave y precisa.

3.2.2 Referencia de curso

La referencia de curso se debe calcular en función de la posición de la aeronave en cada momento. En primer lugar se implementó un algoritmo que calculaba el curso determinando la dirección de la recta que une la aeronave y el punto objetivo, es decir:

$$\psi = \text{atan} \left(\frac{R_{norm} \cos(\phi_{AC})(\lambda_{wp} - \lambda_{AC})}{R_{mer}(\phi_{wp} - \phi_{AC})} \right) \quad (6)$$

Sin embargo este método no proporcionaba un resultado aceptable ya que pequeños errores en el curso hacían que la dirección de aproximación a la pista no fuese la que se buscaba. Además, cuando la aeronave se iba acercando al *waypoint* objetivo, el curso comenzaba a variar de forma notable provocando que la avioneta oscilase al llegar a cada *waypoint*.

Este problema fue solventado implementando un método de seguimiento basado en campos vectoriales [6]. El objetivo de este algoritmo es asociar a la aeronave un vector de curso de referencia en función de la posición en la que se encuentra. Este método se describe en detalle a continuación.

En primer lugar se determina el curso de la recta que se desea seguir:

$$\psi_{12} = \text{atan} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (7)$$

siendo x_2 e y_2 las coordenadas del punto objetivo y x_1 e y_1 las del *waypoint* anterior. En segundo lugar se determina el error lateral:

$$e_{lat} = (x_1 - x) \sin(\psi_{12}) + (y - y_1) \cos(\psi_{12}) \quad (8)$$

siendo x e y las coordenadas de la aeronave.

Las coordenadas cartesianas se han obtenido a partir de la latitud y la longitud tomando como referencia el ARP (*Airport Reference Point*) del aeropuerto de Sevilla.

$$x = R_{mer}(\phi - \phi_{ARP}) \quad (9)$$

$$y = R_{norm}(\lambda - \lambda_{ARP}) \quad (10)$$

Por último, la consigna de curso se calcula empleando la siguiente expresión:

$$\psi = \psi_{12} - \psi_{\infty} \frac{2}{\pi} \text{atan}(K_{path} e_{lat}) \quad (11)$$

siendo ψ_{∞} y K_{path} dos variables de diseño. La primera hace referencia al valor del curso de aproximación a la recta cuando la aeronave se encuentra muy alejada de la misma y K_{path} define la suavidad del acercamiento a la recta.

4 ESTRUCTURA DE CONTROL

Para controlar la aeronave se ha planteado una estructura de control jerárquica que cuenta con dos capas: el controlador de alto nivel y el de bajo. El primero recibe las consignas del sistema de guiado es decir, la altitud, el curso y la velocidad aerodinámica. El segundo es el encargado de garantizar el seguimiento de las referencias que el controlador de alto nivel define: cabeceo y alabeo.

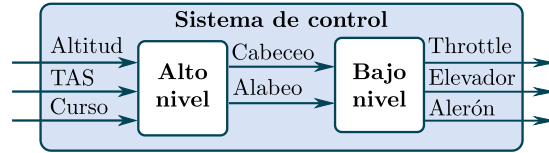


Figura 5: Sistema de control

En todos los controladores se ha implementado una *anti-windup* para evitar que el término integral aumente indefinidamente.

4.1 CONTROLADOR DE ALTO NIVEL

El controlador de alto nivel incluye tres controladores: el control de altitud, el control de curso y el control de velocidad aerodinámica. A continuación se detalla cada uno de ellos.

4.1.1 Control de altitud

El control de altitud recibe la referencia de altitud y envía al controlador de bajo nivel la referencia de cabeceo. El método utilizado para implementar el PI ha sido de implementación directa tal y como se muestra en la siguiente relación:

$$\theta_{ref} = \theta_{trim} + k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (12)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \quad (13)$$

Como se observa, se ha incluido un término de trimado con el objetivo de reducir el esfuerzo del término integral. Este valor, θ_{trim} , se calcula en función de la velocidad de referencia.

$$\theta_{trim} = 0.002 \cdot TAS_{ref}^2 - 0.472 \cdot TAS_{ref} + 27.72 \quad (14)$$

Los coeficientes de esta función cuadrática se han obtenido ajustando la función a los valores obtenidos en varias simulaciones para cruceros a diferentes velocidades.

4.1.2 Control de curso

El control de curso se realiza con un PI que recibe las señales del navegador y mantiene el curso

impuesto enviando una consigna de alabeo. El controlador implementado es un PI con implementación directa:

$$\phi_{ref} = k_p(e_k + \frac{T}{T_i}I_k) \quad (15)$$

Siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \quad (16)$$

4.1.3 Control de TAS

Para el control de la velocidad aerodinámica verdadera (*True Airspeed*, TAS) se han diseñado dos controladores: uno para controlar la velocidad a través de la posición de palanca (*throttle*) y otra a partir del cabeceo.

Control de TAS con throttle

Se ha implementado un PI para controlar la velocidad aerodinámica con la posición de palanca. Las entrada de este controlador es la consigna de velocidad del sistema de navegación y la salida es la posición de palanca establecida. Se ha empleado el método de implementación directa tal y como se indica a continuación:

$$\delta_{T,ref} = k_p(e_k + \frac{T}{T_i}I_k) \quad (17)$$

Siendo $\delta_{T,ref}$ la posición de palanca de referencia e I_k el valor del término integral que se calcula como se indica en la siguiente expresión:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \quad (18)$$

Además, para un mejor ajuste y relajar el trabajo del integrador se ha calculado una función de trimado tal que para cada velocidad de referencia se obtiene una posición de palanca determinada.

$$\delta_{T,trim} = 5 \cdot 10^{-5}TAS_{ref}^2 - 0.0061 \cdot TAS_{ref} + 0.89 \quad (19)$$

Estos coeficientes también se han calculado ajustando los valores obtenidos en simulaciones de vuelo en crucero para diferentes velocidades.

Control de TAS con cabeceo

Con el objetivo de controlar la velocidad de descenso en la última fase del aterrizaje se ha implementado este controlador que recibe la consigna de velocidad aerodinámica y establece un cabeceo que permite alcanzar esa referencia. Se ha implementado un PI con el método de implementación directa:

$$\theta_{ref} = \theta_{trim} + k_p(e_k + \frac{T}{T_i}I_k) \quad (20)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación: $I_k = I_{k-1} + e_k$ y θ_{trim} es el valor del cabeceo de trimado para cada velocidad de referencia con un valor de *throttle* de 0.1.

$$\theta_{trim} = -0.001TAS_{ref}^2 - 0.05TAS_{ref} + 7.5 \quad (21)$$

4.2 Controlador de bajo nivel

En esta sección se tratará el control de bajo nivel que es el encargado de controlar las consignas de alabeo y cabeceo.

4.2.1 Controlador de cabeceo

El controlador de cabeceo recibe las consignas del control de altitud o del control de velocidad aerodinámica. Cuando el modo de vuelo es aterrizaje se utiliza este último mientras que cuando se vuela en crucero se reciben las consignas del control de altitud. Para controlar el cabeceo se ha implementado un PI con el método de implementación directa:

$$\delta_e = k_p(e_k + \frac{T}{T_i}I_k) \quad (22)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación: $I_k = I_{k-1} + e_k$

4.2.2 Controlador de alabeo

El controlador de roll recibe las señal de referencia del bloque de control de curso. Para controlarlo también se ha empleado un PI con el método de implementación directa:

$$\delta_a = k_p(e_k + \frac{T}{T_i}I_k) \quad (23)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación: $I_k = I_{k-1} + e_k$

5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Es esta sección se incluyen y comentan los resultados de la simulación durante el aterrizaje de la Cessna 172P en el aeropuerto de Sevilla. Hay que tener en cuenta, que FlightGear tiene un modelo del contacto con el terreno, por lo tanto es necesario realizar la toma de contacto lo suficientemente suave como para que la aeronave permanezca intacta. Con la trayectoria implementada se consigue que la avioneta aterrice correctamente y sin sufrir daños.

En la figura 6 se muestra el seguimiento de la referencia de velocidad aerodinámica (*True Airspeed*,

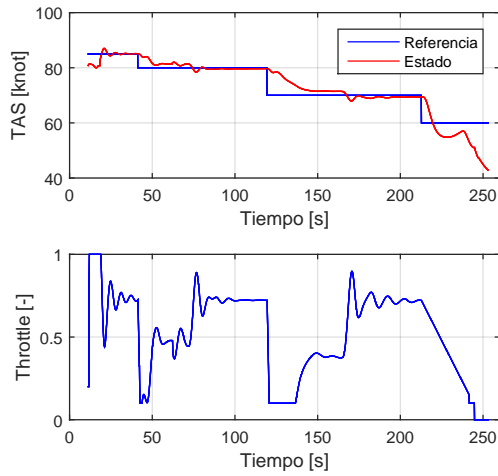


Figura 6: Seguimiento de la referencia de velocidad durante el aterrizaje

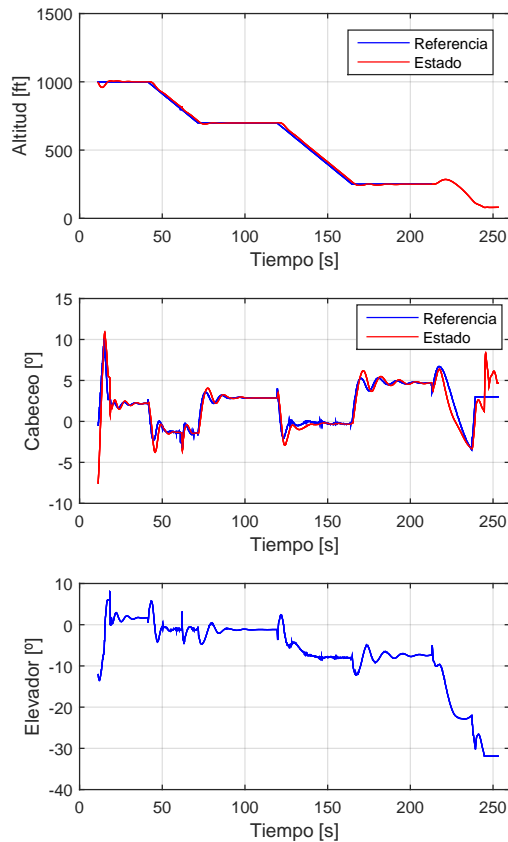


Figura 7: Seguimiento de la referencia de altitud durante el aterrizaje

TAS). Se observa que el seguimiento de la velocidad es adecuado, con sobreoscilaciones del orden de $2 \text{ knot} \equiv 3.7 \text{ km/h}$, que se van atenuando a medida que el sistema alcanza el régimen permanente. Cabe destacar que el cuarto tramo de la referencia en velocidad no se sigue con la variación de la posición de palanca si no con la variación del

cabeceo. En efecto, en la figura 7 se observa que no existe referencia de altitud en este tramo temporal.

Con respecto al control de la altitud, el seguimiento es muy satisfactorio con sobreoscilaciones de tan solo $8 \text{ ft} \equiv 2.5 \text{ m}$.

El control del curso (ver figura 8) también se sigue de forma suave, aunque se observan ciertas oscilaciones, cuyo origen se debe a la dinámica del sistema. En efecto, en avionetas con un solo motor de hélice en el morro, la dinámica lateral está acoplada con la dinámica longitudinal, concretamente los cambios de posición de palanca provocan un alabeo. Esto es debido a la resistencia aerodinámica de la hélice, que aumenta al aumentar la velocidad de la misma. Esta resistencia provoca un momento que es transmitido al fuselaje, resultando en un alabeo.

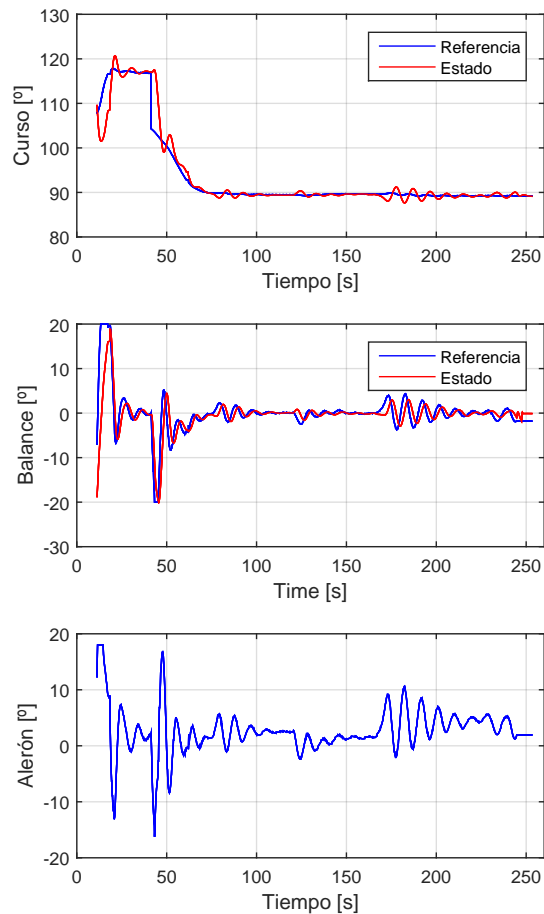


Figura 8: Seguimiento de la referencia de curso durante el aterrizaje

6 CONCLUSIONES

En este artículo se ha implementado la maniobra de aterrizaje para la avioneta Cessna 172P con un controlador PID y un modelo dinámico de FlightGear.

Con respecto al uso del modelo de FlightGear se puede decir que aporta claras ventajas frente al desarrollo del modelo matemático. Además de que se trata de un simulador consolidado y que aporta buenos resultados, con su uso se evita tener que calcular los parámetros aerodinámicos y propulsivos. Por otra parte, una gran ventaja consiste en poder cambiar fácilmente el modelo de la aeronave, lo cual permite comprobar la flexibilidad del control diseñado. Además se puede verificar la robustez del mismo incluyendo viento en la simulación.

El controlador PID ha mostrado buenos resultados teniendo en cuenta la simplicidad de esta metodología de control. Además, el hecho de no conocer los parámetros de la aeronave en cuestión, hace que este controlador sea un muy buen candidato para el problema planteado. En las simulaciones se observa que para futuras revisiones del control convendría incluir en el controlador el acoplamiento existente entre el balance y la posición de palanca del motor.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la junta de Andalucía y al Ministerio de Educación por financiar el trabajo mediante el proyecto Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil (DPI2016-78338-R).

Referencias

- [1] Aschauer, G., Schirrer, A., Kozek, M., (2015) Co-Simulation of Matlab and FlightGear for Identification and Control of Aircraft, International Federation of Automatic Control (IFAC), pp. 067-072.
- [2] Boeing, (2015). Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations — 1959-2015.
- [3] Çetin, E., Kutay, A. T., (2016) Automatic landing flare control design by model-following control and flight test on X-Plane Flight Simulator, International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), pp. 416-420.
- [4] ENAIRE, (2017) Cartas de aproximación de los aeródromos españoles: <http://www.enaire.es/csee/>

Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1078418725163/?other=1083158950596&other2=1083857760137#ancla350

- [5] Lungu, M., Lungu, R., Tutunea, D., (2016) Control of Aircraft Landing using the Dynamic Inversion and the H-inf Control, IEEE. 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 461-466.
- [6] Nelson, D. R., Barver, D. B., McLain, T. W., and Beard, R. W., (2007) Vector field path following for miniature air vehicles, IEE Trans. Robot, vol. 23, no. 3, pp. 519-529.
- [7] Robert M. Rogers, (2003) Applied mathematics in integrated navigation systems, second edition.
- [8] Stevens, B. L., Lewis, F. L., Johnson, E. N., (2016) Aircraft Control and Simulation, Third Edition, Wiley.
- [9] S. Berndt, Jon, & the JSBSim Development Team, (2011) JSBSim Reference Manual. <http://jsbsim.sourceforge.net/JSBSimReferenceManual.pdf>