

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 Politécnica de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

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

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

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

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

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

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

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

Nuñez, Luis Ramón

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

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

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control

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. Zamarreño, 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 Rodríguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/>	
Control Inteligente	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN

Adrián Peidro, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín, Luis Payá

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), España

{adrian.peidro, o.reinoso, arturo.gil, jmarin, lpaya}@goumh.umh.es

Resumen

Cuando el diseño geométrico de un robot paralelo es no-genérico, su lugar de las singularidades puede exhibir puntos aislados. Es bien sabido que dichos puntos aislados son inestables, ya que éstos se destruyen o generan/revelan cúspides cuando el diseño geométrico del robot se desvía ligeramente de un diseño no-genérico, afectando posiblemente a la habilidad del robot para reconfigurarse sin cruzar singularidades indeseables. Este artículo presenta un método basado en expansiones de Taylor de segundo orden para determinar cómo se transforman las singularidades aisladas cuando se perturban los diferentes parámetros geométricos de un robot no-genérico. El método propuesto consiste en aproximar el lugar de las singularidades por una curva cónica en el entorno de la singularidad aislada, para clasificar a continuación dicha cónica en función de las perturbaciones de los diferentes parámetros geométricos. El método presentado se ilustra mediante dos robots paralelos no-genéricos de ejemplo: los robots 3RPR y 2RPR-PR.

Palabras clave: Cúspide, Estabilidad, Robot paralelo, Serie de Taylor, Singularidad aislada

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta un método basado en desarrollos de Taylor de segundo orden para estudiar la estabilidad de singularidades cinemáticas aisladas en robots paralelos. Las singularidades aisladas son un tipo de singularidad de orden superior de gran importancia en la cinemática de estos robots, ya que guardan relación con la habilidad del robot para reconfigurarse y ampliar su espacio de trabajo sin atravesar singularidades indeseables.

Considérese un robot paralelo de 2 grados de libertad (GDL), como es habitual en el estudio de transiciones no-singulares [7], para poder visualizar las singularidades del robot en el plano. Si el robot tuviera más de 2 GDL, simplemente se bloquean todos sus actuadores salvo dos, o bien se analiza un sub-mecanismo independiente de 2 GDL del robot [13, 1]. Denotemos las coordenadas articula-

res actuadas (o variables de entrada) del robot por $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$, y denotemos las variables de salida (que definen la posición y/u orientación de la plataforma móvil del robot) por $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T$. Debido a la cinemática del robot, \mathbf{x} e \mathbf{y} están relacionadas mediante dos ecuaciones de entrada-salida:

$$f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad \text{y} \quad f_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad (1)$$

donde f_1 y f_2 son *funciones de restricción*. El problema cinemático directo consiste en resolver \mathbf{y} del sistema (1) dado \mathbf{x} . Para un \mathbf{x} dado, generalmente este problema tiene varias soluciones distintas que suelen llamarse *modos de ensamblado*.

Este artículo se centra en las singularidades del problema cinemático directo, que son las configuraciones en las que $\det(\mathbf{J}) = 0$, donde $\mathbf{J} = \{j_{pq}\}$ es la matriz Jacobiana 2×2 formada por las derivadas de $\{f_1, f_2\}$ con respecto a las variables de salida: $j_{pq} = \frac{\partial f_p}{\partial y_q}$ ($p, q \in \{1, 2\}$). La condición $\det(\mathbf{J}) = 0$ define el *lugar geométrico de las singularidades* del robot, que es un conjunto de curvas singulares que pueden visualizarse en los planos (x_1, x_2) o (y_1, y_2) . Cuando el robot se aproxima a una curva singular en el plano (x_1, x_2) , al menos dos modos de ensamblado distintos convergen. Cuando se cruza una singularidad, se producen problemas de control de la plataforma móvil del robot.

En este artículo estamos interesados en analizar la estabilidad de los puntos aislados del lugar de las singularidades. Cuando el diseño geométrico de un robot paralelo satisface determinadas condiciones (que dependen de la arquitectura del robot), se dice que su geometría es *no-genérica* y, en tal caso, el lugar de las singularidades exhibe puntos aislados (u otras singularidades de orden superior [13]). Dichas singularidades aisladas son inestables, ya que se destruyen o se transforman en curvas cerradas cuspidales cuando la geometría del robot se desvía ligeramente de un diseño no-genérico debido a pequeñas tolerancias en la manufactura [13, 3, 2].

Como bien se sabe, trazando trayectorias que encierran las cúspides de las curvas singulares cuspidales en el plano (x_1, x_2) , el robot puede modificar su modo de ensamblado sin atravesar singularidades [15, 5, 4, 14, 9], lo cual es beneficioso para ampliar el rango de operación del robot sin

incurrir en pérdidas de control. Por tanto, perturbar la geometría de un robot no-genérico puede afectar a su habilidad para realizar tales transiciones no-singulares entre modos de ensamblado. Por ejemplo, si dicha perturbación transforma una singularidad aislada en una curva con cúspides, éstas permitirán al robot realizar transiciones no-singulares. Por el contrario, la perturbación podría destruir la singularidad aislada, perdiendo el robot la habilidad mencionada. Por consiguiente, es importante poder predecir cómo se transformarán las singularidades aisladas cuando la geometría de un robot no-genérico es perturbada.

Este artículo presenta un método para determinar cómo se transforman las singularidades aisladas de robots paralelos cuando su geometría no-genérica es ligeramente perturbada. Para tal fin, el lugar de las singularidades del robot se aproxima por su desarrollo de Taylor de segundo orden en el entorno de la singularidad aislada, lo que equivale a aproximar el lugar de las singularidades por una cónica (véase la Sección 2). Seguidamente, el análisis de estabilidad de la singularidad aislada se reduce a clasificar dicha cónica en función de las perturbaciones de los diferentes parámetros geométricos del robot. Este método se ilustra en las Secciones 3 y 4 mediante dos robots paralelos de ejemplo. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE DESARROLLOS CUADRÁTICOS DE TAYLOR

Esta sección presenta un método basado en desarrollos en series de Taylor de segundo orden para estudiar la estabilidad de singularidades aisladas. Asíumase que la siguiente ecuación define el lugar de las singularidades en el plano (y_1, y_2) :

$$S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = 0 \quad (2)$$

donde $S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = \det(\mathbf{J})$. Dado un robot paralelo con una geometría $\mathbf{g} = [g_1, \dots, g_d]^T$, la ecuación (2) define un conjunto de curvas singulares en el plano (y_1, y_2) . La forma concreta de dichas curvas dependerá de la geometría \mathbf{g} . Asíumase que para cierta geometría no-genérica \mathbf{g}_0 , las curvas singulares exhiben un punto aislado \mathbf{y}_0 . A continuación, se aproximará S por su desarrollo en serie de Taylor de segundo orden centrado en $(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)$:

$$\begin{aligned} S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) &\approx S(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) \\ &+ \left[\frac{\partial S}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) \right] \Delta \mathbf{y} + \left[\frac{\partial S}{\partial \mathbf{g}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) \right] \Delta \mathbf{g} \\ &+ [\Delta \mathbf{y}^T, \Delta \mathbf{g}^T] \frac{\mathbf{H}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)}{2} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ \Delta \mathbf{g} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

donde \mathbf{H} es la Hessiana de S con respecto a \mathbf{y} y \mathbf{g} , $\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0$, y $\Delta \mathbf{g} = \mathbf{g} - \mathbf{g}_0$. Nótese que $S(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) = 0$ debido a que el punto aislado \mathbf{y}_0 pertenece a las curvas singulares correspondientes a la geometría \mathbf{g}_0 . Además, dado que \mathbf{y}_0 es un punto aislado (por tanto, un punto crítico o especial) de dichas curvas, entonces:

$$\frac{\partial S}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) = [0, 0] \quad (4)$$

lo cual justifica la necesidad de realizar un desarrollo en serie de Taylor hasta el término cuadrático [de otro modo, la ecuación (5) siguiente no definiría una curva en el plano (y_1, y_2)]. La sustitución de (3) en la ecuación (2) proporciona la ecuación que define el lugar de las singularidades en el entorno de la singularidad aislada \mathbf{y}_0 y de la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 :

$$\mathbf{S}_g \Delta \mathbf{g} + [\Delta \mathbf{y}^T, \Delta \mathbf{g}^T] \frac{\mathbf{H}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)}{2} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ \Delta \mathbf{g} \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

donde $\mathbf{S}_g = \frac{\partial S}{\partial \mathbf{g}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)$. A continuación, fragmentamos la Hessiana \mathbf{H} en cuatro bloques:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{12}^T & \mathbf{H}_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde los tamaños de las matrices \mathbf{H}_{11} , \mathbf{H}_{12} , y \mathbf{H}_{22} son 2×2 , $2 \times d$, y $d \times d$, respectivamente. Mediante esta partición de la matriz \mathbf{H} , podemos reescribir la ecuación (5) como sigue:

$$[\Delta \mathbf{y}^T, 1] \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}/2 & \mathbf{K} \\ \mathbf{K}^T & u \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

donde:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{H}_{12} \Delta \mathbf{g}}{2} \quad y \quad u = \left(\Delta \mathbf{g}^T \frac{\mathbf{H}_{22}}{2} + \mathbf{S}_g \right) \Delta \mathbf{g} \quad (8)$$

La ecuación (7) define una cónica en el plano (y_1, y_2) . El tipo de cónica definida por dicha ecuación depende de la matriz de coeficientes \mathbf{C} [12]. Nótese que \mathbf{C} depende de la perturbación $\Delta \mathbf{g}$ de los parámetros geométricos del robot con respecto a la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 . Por tanto, para estudiar cómo afectan dichas perturbaciones geométricas a la estabilidad de la singularidad aislada \mathbf{y}_0 , es suficiente con analizar y clasificar el tipo de cónica definida por \mathbf{C} en función de $\Delta \mathbf{g}$.

En las siguientes secciones, se aplicará este método para estudiar la estabilidad de singularidades aisladas en dos robots paralelos de ejemplo.

3. EJEMPLO 1: ROBOT 3RPR

En esta sección se aplicará el método propuesto para analizar la estabilidad de las singularidades aisladas del robot paralelo plano 3RPR. Este robot, mostrado en la Figura 1, está formado

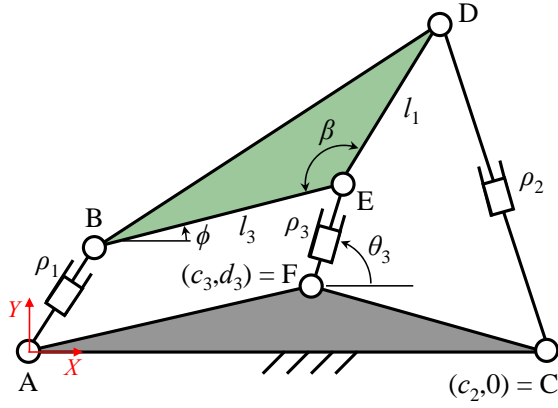


Figura 1: Robot paralelo plano 3RPR general.

por una plataforma fija AFC y una plataforma móvil BDE, estando ambas plataformas conectadas mediante tres cadenas de tipo RPR en paralelo. En este robot se emplean tres actuadores lineales $\{AB, CD, EF\}$, cuyas longitudes respectivas son $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$, para controlar la posición y la orientación de la plataforma móvil BDE. La posición de la plataforma móvil puede parametrizarse mediante las coordenadas polares (ρ_3, θ_3) de la articulación E, mientras que su orientación puede parametrizarse mediante el ángulo ϕ .

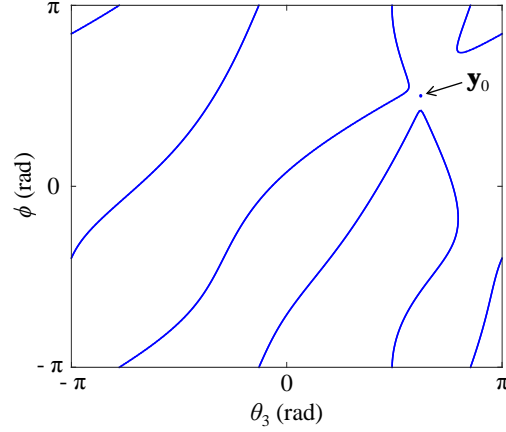
Para poder aplicar el método propuesto en la sección anterior, necesitamos trabajar con un robot de 2 GDL. Por tanto, en adelante consideraremos que bloqueamos la articulación prismática de la pata EF, de manera que su longitud ρ_3 se asumirá constante. De este modo, podremos analizar un robot de 2 GDL con variables de entrada $\mathbf{x} = [\rho_1, \rho_2]^T$ y variables de salida $\mathbf{y} = [\theta_3, \phi]^T$. El resto de parámetros indicados en la Figura 1 se considerarán como parámetros geométricos de diseño del robot, es decir: $\mathbf{g} = [c_2, c_3, d_3, l_1, l_3, \beta, \rho_3]^T$.

Para este robot, las ecuaciones que relacionan las variables de entrada y salida [ecuaciones (1)] se obtienen imponiendo las condiciones de que las longitudes de las patas AB y CD deben ser igual a ρ_1 y ρ_2 , respectivamente. Estas condiciones proporcionan las siguientes funciones de restricción:

$$f_1 = \left\| \begin{bmatrix} c_3 + \rho_3 \cos \theta_3 - l_3 \cos \phi \\ d_3 + \rho_3 \sin \theta_3 - l_3 \sin \phi \end{bmatrix} \right\|^2 - \rho_1^2 \quad (9)$$

$$f_2 = \left\| \begin{bmatrix} c_3 - c_2 + \rho_3 c_{\theta_3} + l_1 \cos(\phi + \pi - \beta) \\ d_3 + \rho_3 s_{\theta_3} + l_1 \sin(\phi + \pi - \beta) \end{bmatrix} \right\|^2 - \rho_2^2 \quad (10)$$

donde $s_{\theta_3} = \sin \theta_3$ y $c_{\theta_3} = \cos \theta_3$. El lugar de las singularidades en el plano de salida de este robot

Figura 2: Representación del lugar de las singularidades en el plano (θ_3, ϕ) , para un robot 3RPR con geometría no-genérica.

viene definido por la siguiente ecuación:

$$S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} \frac{\partial f_2}{\partial \phi} - \frac{\partial f_1}{\partial \phi} \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} = 0 \quad (11)$$

La forma concreta del lugar de las singularidades definido por la ecuación (11) depende del valor de los parámetros geométricos \mathbf{g} . A continuación, analizaremos el lugar de las singularidades para la siguiente geometría no-genérica: $\mathbf{g}_0 = [1.4, 2, -1.5, 1.06, 1.1, 5.65 \text{ rad}, 2.800304375]^T$. Esta geometría es no-genérica porque se corresponde con un lugar de las singularidades que exhibe el siguiente punto aislado: $\mathbf{y}_0 = [1.953791747, 1.571336043]^T \text{ rad}$ (véase la Figura 2). Esta singularidad aislada es una singularidad de orden superior conocida como *lips* [13], debido a la silueta que adquiere ésta en el plano de entrada (ρ_1, ρ_2) cuando se perturba ligeramente la geometría del robot. Esta singularidad aislada es inestable ya que, al desviar ligeramente de \mathbf{g}_0 la geometría del robot, el punto aislado \mathbf{y}_0 se transforma en una curva cerrada o se destruye, pudiéndose alterar la habilidad del robot para realizar transiciones no-singulares. Seguidamente, la aplicación del análisis de la Sección 2 nos permitirá conocer cómo se transforma \mathbf{y}_0 en función de cómo se desvíe de \mathbf{g}_0 la geometría del robot.

A continuación, considérese que todos los parámetros geométricos sufren una pequeña perturbación $\Delta \mathbf{g} = [\Delta c_2, \Delta c_3, \Delta d_3, \Delta l_1, \Delta l_3, \Delta \beta, \Delta \rho_3]^T$ que los aleja de la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 indicada en el párrafo anterior. Sustituyendo \mathbf{y}_0 y \mathbf{g}_0 en la ecuación (7), se obtiene la ecuación de una curva cónica que es una aproximación del lugar de las singularidades perturbado en el plano (θ_3, ϕ) , donde:

$$\frac{\mathbf{H}_{11}}{2} = \begin{bmatrix} -11.8582 & 0.6271 \\ 0.6271 & -2.2934 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1.9288 & -4.4937 \\ -2.6264 & 4.4935 \\ 14.9892 & -6.2409 \\ 8.8979 & 0.0256 \\ -22.3009 & 8.0256 \\ -3.0089 & 0.0440 \\ 14.3325 & -7.4679 \end{bmatrix}^T \Delta \mathbf{g} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u = & -2.5537\Delta c_2\Delta c_3 + 3.5688\Delta c_2\Delta d_3 \\ & + 7.9784\Delta c_2\Delta l_1 - 13.481\Delta c_2\Delta l_3 + 6.2140\Delta c_2\Delta \beta \\ & + 3.3911\Delta c_2\Delta \rho_3 - 2.4456\Delta c_2 + 2.5536\Delta c_3^2 \\ & - 5.4854\Delta c_3\Delta d_3 - 7.9347\Delta c_3\Delta l_1 + 16.382\Delta c_3\Delta l_3 \\ & - 6.2154\Delta c_3\Delta \beta - 6.1244\Delta c_3\Delta \rho_3 + 2.4422\Delta c_3 \\ & - 2.6245\Delta d_3^2 - 7.0749\Delta d_3\Delta l_1 + 6.6182\Delta d_3\Delta l_3 \\ & + 13.546\Delta d_3\Delta \beta - 3.9281\Delta d_3\Delta \rho_3 - 3.1068\Delta d_3 \\ & + 3.8633\Delta l_1\Delta l_3 - 0.013636\Delta l_1\Delta \beta - 3.5808\Delta l_1\Delta \rho_3 \\ & + 0.044585\Delta l_1 - 16.061\Delta l_3\Delta \beta + 1.4638\Delta l_3\Delta \rho_3 \\ & + 4.0521\Delta l_3 - 0.023632\Delta \beta^2 + 14.882\Delta \beta\Delta \rho_3 \\ & - 0.014455\Delta \beta - 1.3549\Delta \rho_3^2 - 3.7941\Delta \rho_3 \quad (14) \end{aligned}$$

El tipo de cónica definida por la ecuación (7) depende de \mathbf{H}_{11} , \mathbf{K} , y u [12]. En primer lugar, dado que $\det(\mathbf{H}_{11}) > 0$, entonces el lugar de las singularidades perturbado es una elipse (real o imaginaria). El tipo de elipse definida por la ecuación (7) dependerá del signo de $\omega = c_{11}\det(\mathbf{C})$, donde c_{11} es el primer elemento de la primera fila de \mathbf{C} : si $\omega > 0$, entonces la ecuación (7) define una elipse imaginaria, mientras que si $\omega < 0$, dicha elipse es real. Si $\omega = 0$, la elipse degenera en un único punto aislado. La perturbación $\Delta \mathbf{g}$ de los parámetros geométricos determinará el signo de ω y, por tanto, determinará el tipo de elipse en la que el punto aislado \mathbf{y}_0 se transforma cuando la geometría del robot se desvía ligeramente de \mathbf{g}_0 .

3.1. PERTURBACIÓN DE UN PARÁMETRO GEOMÉTRICO

Por simplicidad, considérese primero que únicamente se perturba el parámetro ρ_3 , es decir, $\Delta \mathbf{g} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, \Delta \rho_3]^T$. En tal caso:

$$\omega = (1206.22 - 11406.38\Delta \rho_3)\Delta \rho_3 \quad (15)$$

Representando gráficamente la ecuación (15) en la Figura 3, podemos identificar tres casos para perturbaciones $\Delta \rho_3$ suficientemente pequeñas:

- Si $\Delta \rho_3 < 0$, entonces $\omega < 0 \rightarrow$ el lugar de las singularidades es una elipse real.
- Si $\Delta \rho_3 > 0$, entonces $\omega > 0 \rightarrow$ el lugar de las singularidades es una elipse imaginaria.
- Si $\Delta \rho_3 = 0$, entonces $\omega = 0 \rightarrow$ el lugar de las singularidades es una elipse real que ha degenerado en el punto \mathbf{y}_0 .

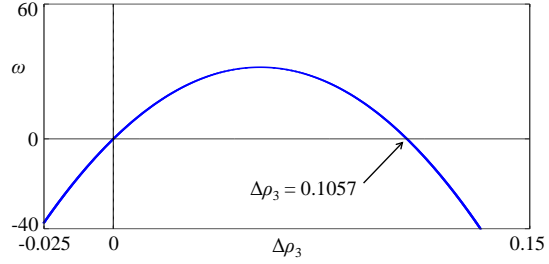


Figura 3: Variación de ω en función de $\Delta \rho_3$.

Por tanto, si partimos del valor no-genérico de ρ_3 y decrementamos ligeramente este parámetro geométrico, la singularidad aislada \mathbf{y}_0 se transforma en una pequeña elipse E_r en el plano (θ_3, ϕ) . Si, partiendo de $\Delta \rho_3 < 0$, incrementamos de forma continua ρ_3 haciendo tender $\Delta \rho_3$ a cero por la izquierda, el tamaño de E_r disminuye continuamente, hasta que esta pequeña elipse real degenera de nuevo en el punto \mathbf{y}_0 . Si la perturbación $\Delta \rho_3$ sigue incrementándose y se torna positiva, entonces el punto \mathbf{y}_0 se transforma en una elipse imaginaria, es decir, \mathbf{y}_0 desaparece del plano (θ_3, ϕ) .

La Figura 4a ilustra la transformación de \mathbf{y}_0 en una curva cerrada E_r aproximadamente elíptica, para la perturbación $\Delta \rho_3 = -0.00001$: la elipse definida por la ecuación (7) se representa mediante trazo punteado de color rojo, mientras que el lugar de las singularidades exacto [es decir, la curva definida por la ecuación (11)] se representa mediante trazo continuo de color azul. Nótese que la ecuación (7) es una precisa aproximación del lugar de las singularidades exacto para perturbaciones suficientemente pequeñas, mientras que para perturbaciones mayores dicha aproximación no es buena (por ejemplo, véase la Figura 4b, en la que $\Delta \rho_3 = -0.005$).

Resolviendo la cinemática inversa de este robot [es decir, resolviendo ρ_1 y ρ_2 de las ecuaciones (9) y (10) a partir de θ_3 y ϕ], es posible transformar la elipse real E_r al plano de entrada. La imagen de la elipse E_r en el plano de entrada es una pequeña curva cerrada con dos cúspides (véase la Figura 5). Es bien sabido que dichas cúspides permiten al robot reconfigurarse entre distintos modos de ensamblado sin cruzar singularidades. Por tanto, la destrucción de la elipse real E_r (cuando $\omega > 0$) provoca la destrucción de dichas cúspides, de manera que el robot pierde la anterior habilidad (reconfigurarse sin cruzar singularidades) en la región del plano (ρ_1, ρ_2) cercana a la curva cerrada bicúspide de la Figura 5 (aunque, como se observa en dicha figura, el lugar de las singularidades de este robot exhibe otras cúspides que no son destruidas junto con E_r y que siguen posibilitando reconfiguraciones no-singulares).

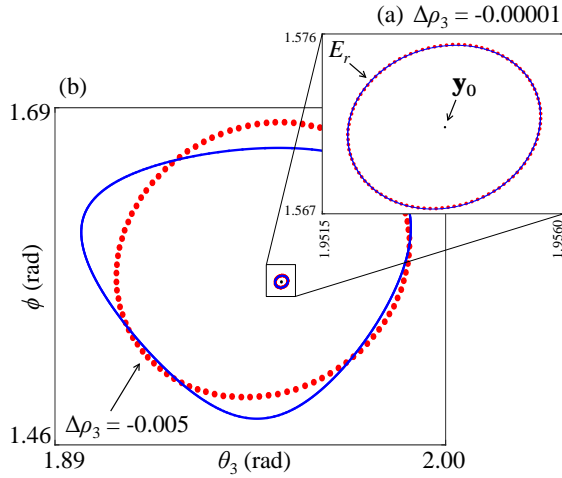


Figura 4: Cuando ρ_3 disminuye ligeramente, el punto aislado y_0 se transforma en una curva cerrada que puede aproximarse por una elipse.

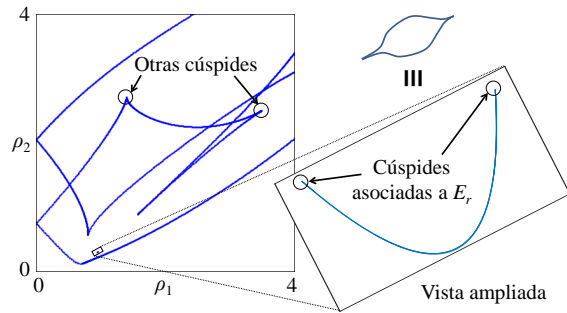


Figura 5: Lugar de las singularidades del robot 3RPR con $\Delta\rho_3 = -0.00001$. Se muestra una vista ampliada de la curva cerrada bicúspide que es la imagen de la elipse real E_r de la Figura 4a en el plano (ρ_1, ρ_2) .

Nótese que, según la Figura 3, ω se vuelve de nuevo negativa para $\Delta\rho_3 > 0.1057$, lo que implica que la elipse real E_r definida por la ecuación (7) reaparece de nuevo para $\Delta\rho_3 > 0.1057$. Esto podría llevar a pensar, erróneamente, que el lugar de las singularidades exacto [definido por la ecuación (11)] también debería exhibir una pequeña curva cerrada (de forma aproximadamente elíptica) en el plano (θ_3, ϕ) para $\Delta\rho_3 > 0.1057$, a causa de la reaparición de la elipse real E_r . Sin embargo, esto no es cierto ya que la perturbación $\Delta\rho_3 = 0.1057$ es demasiado grande para que la ecuación (7) siga siendo una aproximación válida del lugar de las singularidades exacto. Por tanto, el análisis del signo de ω en la ecuación (15) únicamente es válido para valores suficientemente pequeños de $|\Delta\rho_3|$.

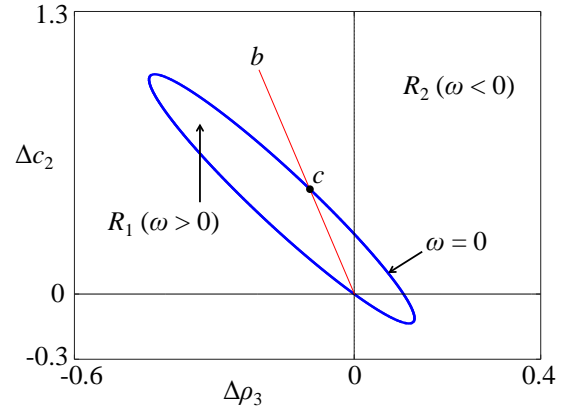


Figura 6: Variación del signo de ω en función de las perturbaciones $\Delta\rho_3$ y Δc_2 .

3.2. PERTURBACIÓN DE DOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

A continuación, considérese que ρ_3 y c_2 son perturbados, es decir: $\Delta\mathbf{g} = [\Delta c_2, 0, 0, 0, 0, 0, \Delta\rho_3]^T$. En tal caso, la expresión de ω es:

$$\begin{aligned} \omega = & -2811.780\Delta c_2^2 - 10847.38\Delta c_2\Delta\rho_3 \\ & + 777.4378\Delta c_2 - 11406.38\Delta\rho_3^2 + 1206.22\Delta\rho_3 \end{aligned} \quad (16)$$

La Figura 6 muestra cómo varía el signo de ω en función de las perturbaciones $\Delta\rho_3$ y Δc_2 . El plano $(\Delta\rho_3, \Delta c_2)$ queda dividido en dos regiones por la elipse definida por $\omega = 0$: una región R_1 interior a esta elipse, y otra región R_2 exterior a ella. Dado que $\omega < 0$ en la región R_2 , para perturbaciones pertenecientes a la región exterior la ecuación (7) define una elipse real. Es decir, para $(\Delta\rho_3, \Delta c_2) \in R_2$, el punto aislado y_0 se deforma en una curva cerrada con forma aproximadamente elíptica, y ésta se transforma en una curva bicúspide cuando se transforma al plano (ρ_1, ρ_2) .

Para perturbaciones pertenecientes a la región R_1 se tiene que $\omega > 0$, luego la ecuación (7) define una elipse imaginaria. Esto significa que el punto y_0 desaparece, y el robot pierde la habilidad de reconfigurarse entre distintas soluciones del problema cinemático directo sin cruzar singularidades. La pérdida de esta habilidad es únicamente local, ya que, como muestra la Figura 5, el lugar de las singularidades de este robot exhibe otras cúspides que no se destruyen junto con y_0 .

Finalmente, es importante recalcar de nuevo que el comportamiento del lugar de las singularidades exacto [definido por la ecuación (11)] ante perturbaciones grandes no puede predecirse analizando las transformaciones sufridas por la elipse definida por la ecuación (7). Por ejemplo, si partimos

de la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 (es decir, del origen $\Delta\rho_3 = \Delta c_2 = 0$) y perturbamos estos dos parámetros geométricos a lo largo del segmento b (véase la Figura 6), al atravesar el punto c (al pasar de la región R_1 a la región R_2) no observaremos la aparición de ninguna curva cerrada (con forma aproximadamente elíptica) en el lugar de las singularidades exacto, a pesar de que la elipse definida por la ecuación (7) pasa de imaginaria a real. Esto se debe a que cruzar el punto c requiere perturbaciones tan grandes que invalidan la aproximación cuadrática de la ecuación (7).

4. EJEMPLO 2: ROBOT 2RPR-PR

En esta sección se aplicará el método propuesto para analizar la estabilidad de las singularidades aisladas del robot 2RPR-PR, mostrado en la Figura 7. Este robot puede obtenerse bloqueando la orientación de la pata central del robot 3RPR mostrado en la Figura 1, de manera que la longitud de dicha pata central deja de ser una variable articular controlada y pasa a ser una variable pasiva. Aunque el robot de la Figura 7 puede obtenerse como caso particular del robot de la Figura 1, en este artículo no se ha empleado la misma notación para denotar las variables cinemáticas comunes a ambos robots, ya que se ha preferido respetar la notación empleada en [6] para el robot 2RPR-PR.

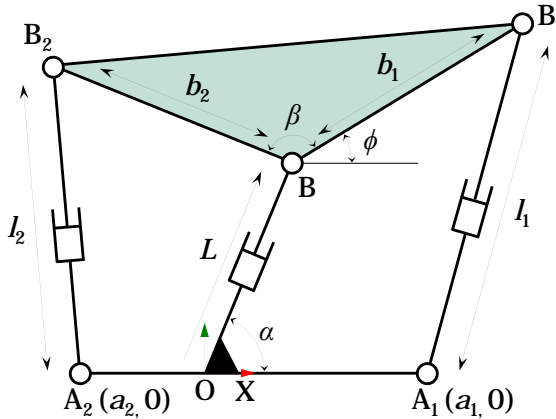


Figura 7: Robot paralelo 2RPR-PR.

El robot 2RPR-PR es un robot de 2 GDL en el que se emplean dos actuadores lineales A_1B_1 y A_2B_2 (con longitudes l_1 y l_2 , respectivamente) para controlar la posición y orientación de la plataforma móvil triangular BB_1B_2 . La articulación B está conectada a una guía o pata pasiva OB que forma un ángulo fijo α con el segmento A_2A_1 , de manera que la posición de la plataforma móvil queda totalmente definida por la posición L de la articulación B a lo largo de dicha guía. La orientación de la plataforma móvil está definida por ϕ .

La cinemática de este mecanismo paralelo de 2 GDL fue estudiada en [11], donde se proponía un robot articulado de tipo serpiente formado por varios mecanismos 2RPR-PR conectados en serie. En [10] se presentó un robot trepador para inspeccionar estructuras verticales; dicho robot estaba formado también por la combinación serie de 4 mecanismos paralelos de tipo 2RPR-PR. En [8] se presentó una herramienta gráfica para simular la cinemática y el control dinámico de este mecanismo paralelo. En [6] se analizó en detalle el problema cinemático directo de este mecanismo paralelo, poniendo especial énfasis en diseños geométricos no-genéricos para los que dicho problema se simplifica y admite solución analítica.

En [7] se estudiaron en detalle las singularidades y la multiplicidad de las soluciones del problema cinemático directo de uno de los diseños no-genéricos analizados en [6], caracterizado por $\alpha = \pi/2$ rad y $\beta = \pi$ rad. Tal diseño no-genérico implica que la guía pasiva OB es perpendicular al segmento A_2A_1 , y que las tres articulaciones BB_1B_2 están alineadas. En [7] se demostró que el lugar de las singularidades de dicho diseño no-genérico exhibe un punto aislado λ_π que, al rodearlo en el plano (l_1, l_2) , permite al robot reconfigurarse entre distintos modos de ensamblado sin cruzar singularidades. Aunque este fenómeno parecía ocurrir en ausencia de cúspides, en [3] se perturbó ligeramente este diseño no-genérico para demostrar que el punto aislado λ_π es en realidad una deltoide (curva cerrada con tres cúspides) degenerada en un punto, de manera que rodear el punto λ_π equivale a rodear tres cúspides "ocultas".

A continuación, se aplicará el método propuesto en el presente artículo para analizar la estabilidad de la singularidad aislada mencionada en el párrafo anterior. Para el robot de la Figura 7, las variables de entrada son las longitudes articulares: $\mathbf{x} = [l_1, l_2]^T$, mientras que las variables de salida son la posición y orientación de la plataforma móvil: $\mathbf{y} = [L, \phi]^T$. Los parámetros geométricos son: $\mathbf{g} = [a_1, a_2, b_1, b_2, \alpha, \beta]^T$. Las funciones de restricción se obtienen de nuevo imponiendo la condición de que los actuadores lineales A_1B_1 y A_2B_2 tengan longitudes l_1 y l_2 , respectivamente:

$$f_1 = \left\| \begin{bmatrix} L \cos \alpha + b_1 \cos \phi - a_1 \\ L \sin \alpha + b_1 \sin \phi \end{bmatrix} \right\|^2 - l_1^2 \quad (17)$$

$$f_2 = \left\| \begin{bmatrix} L \cos \alpha + b_2 \cos(\phi + \beta) - a_2 \\ L \sin \alpha + b_2 \sin(\phi + \beta) \end{bmatrix} \right\|^2 - l_2^2 \quad (18)$$

El lugar de las singularidades de este robot está definido en el plano (L, ϕ) por la ecuación:

$$S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = \frac{\partial f_1}{\partial L} \frac{\partial f_2}{\partial \phi} - \frac{\partial f_1}{\partial \phi} \frac{\partial f_2}{\partial L} = 0 \quad (19)$$

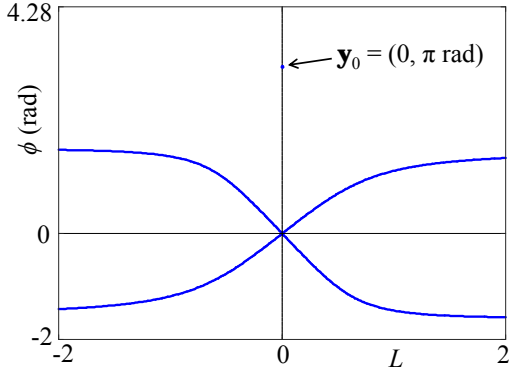


Figura 8: Lugar de las singularidades de un robot 2RPR-PR no-genérico.

A continuación se analizará el lugar de las singularidades de la geometría no-genérica estudiada en [7, 3], que está definida por: $\mathbf{g}_0 = [0.3, -0.7, 0.6, 0.5, \pi/2 \text{ rad}, \pi \text{ rad}]^T$. Como se ha indicado anteriormente, esta geometría implica que la guía pasiva OB es perpendicular a A_2A_1 , y que las tres articulaciones BB_1B_2 están alineadas.

La Figura 8 representa el lugar de las singularidades en el plano (L, ϕ) para la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 indicada en el párrafo previo. Dicho lugar de las singularidades exhibe un punto aislado $\mathbf{y}_0 = [0, \pi \text{ rad}]^T$. Seguidamente, se aplicará el análisis presentado en la Sección 2 para estudiar la estabilidad de esta singularidad aislada. Asíumase que todos los parámetros geométricos se desvían ligeramente de \mathbf{g}_0 , es decir: $\Delta \mathbf{g} = [\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta b_1, \Delta b_2, \Delta \alpha, \Delta \beta]^T$. Sustituyendo \mathbf{y}_0 y \mathbf{g}_0 en la ecuación (7), la cual es una aproximación del lugar de las singularidades en el plano (L, ϕ) en la vecindad de \mathbf{y}_0 , resulta en:

$$\frac{\mathbf{H}_{11}}{2} = \begin{bmatrix} 4.4 & -0.34 \\ -0.34 & 1.2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{K} = [-0.54\Delta\alpha - 0.1\Delta\beta, 0.6\Delta\beta - 1.062\Delta\alpha]^T \quad (21)$$

$$u = -1.26\Delta\alpha\Delta\beta \quad (22)$$

Nótese que, a pesar de que se han perturbado todos los parámetros geométricos, según las ecuaciones (21) y (22), la transformación de la singularidad aislada \mathbf{y}_0 únicamente depende de las perturbaciones en α y β . Éstos son, precisamente, los únicos dos parámetros geométricos que determinan si \mathbf{g}_0 es una geometría genérica o no, como ya se ha explicado anteriormente. Esto contrasta con el ejemplo de la Sección 3, donde la transformación sufrida por la singularidad aislada dependía de las perturbaciones en todos los parámetros geométricos del robot [véanse las ecuaciones (13) y (14)].

Dado que $\det(\mathbf{H}_{11}) > 0$, la ecuación (7) define una elipse real o imaginaria, en función del signo

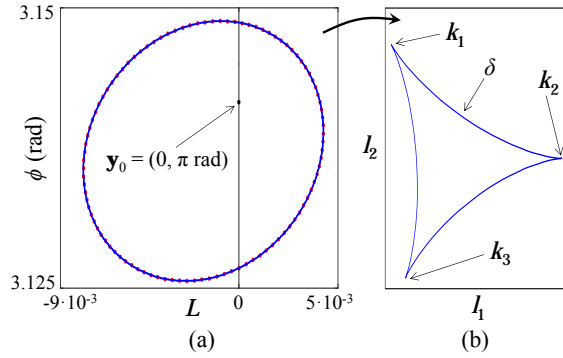


Figura 9: (a) Lugar de las singularidades aproximadamente elíptico cerca de \mathbf{y}_0 , para $\Delta\alpha = \Delta\beta = -0.01 \text{ rad}$. (b) La imagen de esta elipse en el plano (l_1, l_2) es una deltoide con cúspides $k_1 \approx (0.89996, 1.20002)$, $k_2 \approx (0.90009, 1.19996)$, y $k_3 \approx (0.89997, 1.19990)$.

de $\omega = c_{11}\det(\mathbf{C})$:

$$\omega = -0.228096(110\Delta\alpha^2 + 17\Delta\alpha\Delta\beta + 30\Delta\beta^2) \quad (23)$$

ω en la ecuación (23) es una forma cuadrática definida negativa, es decir, $\omega < 0 \forall (\Delta\alpha, \Delta\beta) \neq (0, 0)$. Por tanto, si cualquiera de los dos parámetros geométricos $\{\alpha, \beta\}$ se desvía de su valor no-genérico, entonces la ecuación (7) define una elipse real en el plano (L, ϕ) , independientemente de la dirección de dichas perturbaciones. Esto significa que el punto aislado \mathbf{y}_0 del lugar de las singularidades exacto *siempre* se deforma en una pequeña curva cerrada que puede aproximarse por una elipse si las perturbaciones son suficientemente pequeñas.

Si dicha elipse se transforma al plano (l_1, l_2) , ésta se convierte en una deltoide δ , que es una curva cerrada que exhibe tres cúspides (véase el ejemplo de la Figura 9). Como ya se ha comentado con anterioridad, esta deltoide permite a este robot modificar su modo de ensamblado sin atravesar singularidades si se rodea cualquiera de sus cúspides en el plano (l_1, l_2) . Si se rodea la deltoide entera (es decir, sus tres cúspides simultáneamente), se produce un efecto similar [3].

Comparando el análisis presentado en esta sección con el de la Sección 3, se observa claramente la diferencia de estabilidad entre las singularidades aisladas estudiadas en ambas secciones. Mientras que la singularidad aislada analizada en la Sección 3 (singularidad tipo *lips*) puede destruirse aplicando las perturbaciones apropiadas (es decir, aquellas perturbaciones que hacen $\omega > 0$), provocando la destrucción de dos cúspides, la singularidad aislada estudiada en la presente sección no puede destruirse, ya que cualquier perturbación *siempre* la transforma en una pequeña elipse cuya imagen en

el plano de entrada es una deltoide. Esto ilustra el hecho de que la deltoide es una singularidad estable obtenida al perturbar una singularidad aislada de multiplicidad 4 [3], que es el caso de la singularidad aislada analizada en la presente sección.

5. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado un método para determinar cómo se transforman las singularidades aisladas de robots paralelos cuando los parámetros geométricos del robot se desvían ligeramente de diseños no-genéricos. El método propuesto consiste en aproximar el lugar de las singularidades por una curva cónica, para clasificar dicha cónica en función de las perturbaciones de los diferentes parámetros geométricos del robot. Este método ha sido ilustrado mediante dos robots paralelos que poseen singularidades aisladas.

En el futuro, extenderemos este análisis a otras singularidades de orden superior distintas a las singularidades aisladas [13], así como a robots con más de 2 GDL. Además, también exploraremos la aplicación práctica del método propuesto en el diseño robusto de robots paralelos cuspidales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los Ministerios de Educación (ayuda FPU13/00413) y Economía (proyecto DPI 2016-78361-R).

Referencias

- [1] Caro S., Wenger P., and Chablat D. Non-singular assembly mode changing trajectories of a 6-DOF parallel robot. In *ASME 2012 IDETC/CIE Conference*, pp. 1245–1254, 2012.
- [2] Coste M., Chablat D., and Wenger P. *New Trends in Mechanism and Machine Science*, chapter Perturbation of Symmetric 3-RPR Manipulators and Asymptotic Singularities, pp. 23–31. Springer Netherlands, 2013.
- [3] Coste M., Wenger P., and Chablat D. Hidden cusps. In *15th International Symposium on Advances in Robot Kinematics*, 2016.
- [4] DallaLibera F. and Ishiguro H. Non-singular transitions between assembly modes of 2-DOF planar parallel manipulators with a passive leg. *Mech. Mach. Theory*, 77:182–197, 2014.
- [5] Husty M., Schadlbauer J., Caro S., and Wenger P. The 3-RPS manipulator can have non-singular assembly-mode changes. In Thomas F. and Pérez Gracia A., editors, *Computational Kinematics: Proceedings of the 6th International Workshop on Computational Kinematics (CK2013)*, pp. 339–348. Springer Netherlands, 2014.
- [6] Kong X. and Gosselin C. M. Generation and forward displacement analysis of RPR-PR-RPR analytic planar parallel manipulators. *J. Mech. Design*, 124(2):294–300, 2002.
- [7] Peidró A., Marín J.M., Gil A., and Reinoso O. Performing nonsingular transitions between assembly modes in analytic parallel manipulators by enclosing quadruple solutions. *J. Mech. Design*, 137(12):122302, 2015.
- [8] Peidró A., Reinoso Ó., Gil A., Marín J. M., and Payá L. A simulation tool to study the kinematics and control of 2RPR-PR parallel robots. *IFAC-PapersOnLine*, 49(6):268 – 273, 2016.
- [9] Peidró A., Reinoso O., Gil A., Marín J.M., and Payá L. A virtual laboratory to simulate the control of parallel robots. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29):19–24, 2015.
- [10] Peidró A., Reinoso Ó., Payá L., Berenguer Y., Gil A., and Marín J.M. Análisis cinemático y simulación de un robot trepador con arquitectura serie-paralela. In *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, pp. 400–407, 2015.
- [11] Ridgeway S.C., Crane C.D., and Duffy J. A forward analysis of a two degree of freedom parallel manipulator. In Lenarčič J. and Parenti-Castelli V., editors, *Recent Advances in Robot Kinematics*, pp. 431–440. Springer Netherlands, 1996.
- [12] Srinivasan Vijay. *Theory of Dimensioning: An Introduction to Parameterizing Geometric Models*. CRC Press, 2003.
- [13] Thomas F. and Wenger P. On the topological characterization of robot singularity loci. a catastrophe-theoretic approach. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3940–3945, May 2011.
- [14] Urizar M., Petuya V., Altuzarra O., and Hernández A. Assembly mode changing in the cuspidal analytic 3-RPR. *IEEE Trans. Robot.*, 28(2):506–513, 2012.
- [15] Zein M., Wenger P., and Chablat D. Non-singular assembly-mode changing motions for 3-RPR parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*, 43(4):480–490, 2008.