



XLIV JORNADAS DE AUTOMÁTICA



Zaragoza
6-8 Septiembre 2023

Libro de Actas

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

XLIV JORNADAS DE AUTOMÁTICA : LIBRO DE ACTAS

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

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



Universidad
Zaragoza

ORGANIZAN:

Comité Español de Automática
Universidad de Zaragoza

EDITORES:

José Manuel Andújar Márquez

Ramón Costa Castelló

Luis Montano Gella

Alejandro Mosteo Chagoyen

Vanesa Loureiro Vázquez

Pedro Jesús Cabrera Santana

Elisabet Estévez Estévez

Raúl Marín Prades

Eduardo Rocón de Lima

David Muñoz de la Peña Sequedo

Luis Payá Castelló

Manuel Gil Ortega

Óscar Reinoso García

Carlos Vilas Fernández

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

ISBN: 978-84-9749-860-9

THEMA: TJFM, TJF

CDU: 681.05(063)



© de esta edición: UDC, CEA, UNIZAR

© de los textos: los autores

PREFACIO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COMITÉS

Comité de Dirección

- José Manuel Andújar
- Ramón Costa
- Luis Montano

Comité Científico

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

Comité Organizador Local

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

Colaboradores

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

ORGANIZADORES Y PATROCINADORES

Organizadores

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

Patrocinadores de la Jornadas 2023

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

Patrocinadores CEA

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

Tabla de contenidos

Automar

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

Bioingeniería

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

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

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

Educación en Automática

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

Aprendizaje en el ámbito de la Introducción a la Robótica Móvil: Experiencia en la Competición ASTI Robotics Challenge / Raúl Marín Prades, Josep Marqués Verdegal, Josep Marín Garcés, Miguel De Diego Pérez, Alvaro Arbona Rodríguez, Jairo Muñoz García, Edgar Rogalsky, Pau Monteagut Bofi, José Vicente Martí Aviles, Antonio Morales Escrig, Enric Cervera Mateu and Pedro J. Sanz	.....	247
Percepción del alumnado sobre la perspectiva de género en las asignaturas de la rama Electrónica / Oscar Miguel-Escrig, Jorge Segarra-Tamarit and Julio-Ariel Romero-Pérez	.....	253
Plataforma giroscópica mejorada para la práctica docente en Ingeniería de control / Silvano Nájera, Francisco Alejandro Zambrano, Ramón Rico, Javier Rico-Azagra and Montserrat Gil-Martínez	.....	259
Enseñando diseño electrónico y control avanzado con un levitador magnético / Édgar Ramírez Laboreo, Antonio Bono Nuez, Eduardo Montijano Muñoz and Carlos Sagüés Blázquez	.....	265
Creación de ejercicios con corrección automática con MATLAB Grader para asignaturas de control automático / Inés Tejado, Cristina Nuevo-Gallardo and Emiliano Pérez	.....	271
Método para la mejora de la comprensión basado en el aprendizaje activo. Un caso de estudio en la ingeniería de control. / Sergio Velázquez-Medina and Pedro Cabrera-Santana	.....	277
 Ingeniería de control		
Modelado y control de la potencia frigorífica de una máquina de absorción / Luis Fernando Acedo, Manuel Garrido Satue, Francisco Rodríguez Rubio and Manuel Gil Ortega Linares	.....	283
Control del circuito de refrigeración en instalaciones de destilación por membranas / Alejandro Bueso, Juan Diego Gil Vergel, Isabel Requena, Lidia Roca, José Liria García and Manuel Berenguel	.....	289
Estimación de la producción de microalgas en fotobiorreactores industriales / Emma Delgado, Enrique Rodríguez, Alfonso Baños, Antonio Barreiro, José Carlos Moreno and José Luis Guzmán	.....	295
Reparto frecuencial de la realimentación en estructuras en cascada: aplicación al control robusto de un servomotor / Montserrat Gil-Martínez, Javier Rico-Azagra and Silvano Nájera	.....	300
Implementing rover speed control in Paparazzi UAV / Alfredo Gonzalez-Calvin, Juan Francisco Jimenez and Lía García-Pérez	.....	306
Sensibilidad del Predictor de Smith respecto de pequeñas desviaciones en la identificación del retardo: un enfoque gráfico / Andrés Gonzalo and Antonio Romeo	.....	311
Búsqueda de equilibrios de Nash en juegos poblacionales bajo información parcial y su aplicación en juegos de congestión / Juan Martínez-Piazuelo, Carlos Ocampo-Martínez and Nicanor Quijano	.....	317
A model independent constrained predictive control for the Furuta pendulum / Blanca Martínez, Javier Sanchis and Sergio García-Nieto	.....	323
Análisis de la frecuencia de muestreo en sistemas multi-robot / Francisco José Mañas Álvarez, María Guinaldo, Raquel Dormido and Sebastián Dormido	.....	329
Controlador Híbrido para un Fotobiorreactor Industrial Raceway / Juan Ignacio Mulero Martínez, Alfonso Baños, José Carlos Moreno Úbeda and José Luis Guzmán Sánchez	.....	335

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

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

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

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

Estimación de zonas transitables en nubes de puntos 3D con redes convolucionales dispersas. / Antonio Santo, Arturo Gil, David Valiente, Mónica Ballesta and Óscar Reinoso	.....	732
Evolution of robot controllers for solving multiple tasks sequentially / Rafael Sendra-Arranz and Álvaro Gutiérrez	.....	738
Actuador hidráulico blando para navegación de catéteres: Diseño, simulación y fabricación de primeros prototipos / Andrés J. Serrano-Balbontín, Enrique Mancha-Sánchez, Inés Tejado and Blas M. Vinagre	.....	744
Análisis comparativo de técnicas de segmentación de estructuras reticulares / Francisco Jose Soler, Adrián Peidro Vidal, Marc Fabregat-Jaén, Luis Payá and Óscar Reinoso	.....	750
Benchmarking the LiCAS dual arm teleoperation system for aerial and ground service robotic applications / Alejandro Suarez and Aníbal Ollero	.....	756
Innovación en la industria juguetera: sistema robótico para el desmoldeo / Daniel Sánchez, Carlos A. Jara and Francisco Gomez-Donoso	.....	762
Control híbrido para la manipulación robótica de elementos flexibles / Benjamín Tapia Sal Paz, Gorka Sorrosal, Aitziber Mancisidor and Itziar Cabanes Axpe	.....	768
Robot nadador con flagelo flexible basado en actuación única: Prueba de propulsión en condiciones de bajo número de Reynolds / Inés Tejado, José Antonio Rebollo-Gómez Coronado, Cristina Nuevo-Gallardo and Blas M. Vinagre	.....	773
Computación frontera: influencia de latencias en la precisión de robots / Dominik Urbaniak, Jan Rosell, Raul Suarez and Michael Suppa	.....	779
A generic controller for teleoperation on robotic manipulators using low-cost devices / Bartek Lukawski, Juan G. Victores and Carlos Balaguer	.....	785
 Computadores y Control		
Development of components for microservice based applications / Julen Cuadra, Ekaitz Hurtado, Alejandro López, Elisabet Estévez, Oskar Casquero and Aintzane Armentia	.....	789
Control de acceso remoto a redes industriales / Miguel Díaz-Cacho Medina, Andre Chaves Méndes and Alejandro Pereira	.....	795
Modelo Digital para Definir y Emular Automatismos Secuenciales / Sergio Illana, Alejandro Sánchez García, Elisabet Estévez, Juan Gómez Ortega and Javier Gámez García	.....	801
Entorno PIL para la validación de controladores de turbinas eólicas basados en IEC-61131 / Alberto Martínez, J. Enrique Sierra-García, Matilde Santos and Lorenzo Leija	.....	807
Particionado del software de control de un prototipo de vehículo autónomo / Luis Ortiz Enguix, Yolanda Valiente Moreno, Patricia Balbastre Betoret, José Enrique Simó Ten and Alfons Crespo Lorente	.....	813
Modelado, simulación y control remoto de robot de 2GL en redes 5G / Mario Peñacoba, J. Enrique Sierra-García, Matilde Santos and Lorenzo Leija	.....	819
Aplicación para el estudio de medida de distancias mediante UWB / Antonio Ruiz, Juan Garrido, Francisco Vazquez and Mario L. Ruz	.....	825

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

Visión por computador

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Planificación de trayectorias en robots redundantes con mapas de factibilidad y RRT

Fabregat-Jaén, M.^{a,*}, Peidró, A.^a, Soler, F.J.^a, Gil, A.^a, Reinoso, O.^{a,b}

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

^b*ValgrAI: Valencian Graduate School and Research Network of Artificial Intelligence, Camí de Vera s/n, Edificio 3Q, 46022 Valencia, España.*

To cite this article: Fabregat-Jaen, M, Peidro, A, Soler, F.J, Gil, A, Reinoso, O. 2023. Motion-planning of redundant robots with feasibility maps and RRT. XLIV Jornadas de Automática, 581-586
<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.581>

Resumen

Los manipuladores redundantes ofrecen múltiples ventajas, tales como manipulabilidad mejorada, o evasión de singularidades u obstáculos. Sin embargo, la redundancia cinemática también introduce retos adicionales, como la necesidad de resolver un problema de cinemática inversa indeterminado. Este artículo presenta un método novedoso para la planificación de trayectorias de manipuladores redundantes, basado en la exploración de mapas de factibilidad. El método propuesto es una extensión del algoritmo Rapidly-exploring Random Trees (RRT), modificado para explorar el espacio redundante de la tarea con la finalidad de encontrar un camino factible subóptimo en el espacio articular, sacrificando optimalidad por escalabilidad a mayor número de grados de redundancia. El método es capaz de seguir una trayectoria dada en el espacio de la tarea, mientras considera otras restricciones, como la evasión de obstáculos o límites articulares. El método se ha validado en simulación.

Palabras clave: Manipuladores redundantes, Planificación de trayectorias, Evasión de obstáculos, Mapas de factibilidad, RRT

Motion-planning of redundant robots with feasibility maps and RRT

Abstract

Redundant manipulators offer multiple advantages, such as improved manipulability, or evasion of singularities and obstacles. However, kinematic redundancy also introduces additional difficulties, such as the need to solve an underdetermined inverse kinematics problem. This article presents a novel method for motion planning of redundant manipulators, based on the exploration of feasibility maps. The proposed method is an extension of the Rapidly-exploring Random Trees (RRT) algorithm, modified to explore the redundant task space with the purpose of finding a feasible suboptimal path in the joint space, sacrificing optimality for scalability to a higher number of degrees of redundancy. The method is capable of following a given trajectory in the task space, while considering other constraints, such as obstacle avoidance or joint limits. The method has been validated under simulation.

Keywords: Redundant manipulators, Motion planning, Obstacle avoidance, Feasibility maps, RRT

1. Introducción

La redundancia cinemática ocurre cuando un manipulador posee más grados de libertad (GDL) que los necesarios para cumplir una tarea. Este aspecto es común en muchos robots, como manipuladores industriales, robots humanoides o robots móviles. La presencia de estos GDL redundantes permite efectuar la tarea de varias formas, lo cual puede ser aprovechado para mejorar el desempeño del robot (Siciliano et al., 2008). Por ejemplo, los grados de redundancia pueden ser utilizados pa-

ra evitar singularidades (Nakamura and Hanafusa, 1986; Wampler, 1986), mejorar la manipulabilidad (Jin et al., 2017), o evitar obstáculos (Zhang and Wang, 2004).

Sin embargo, la redundancia cinemática también introduce retos adicionales, como la necesidad de resolver un problema de cinemática inversa (CI) indeterminado para controlar el manipulador, lo cual resulta en un número infinito de soluciones para la CI de un manipulador redundante.

La forma más común de solucionar este problema es resol-

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

viendo la CI a nivel diferencial, por medio de la pseudoinversión de Moore-Penrose de la matriz Jacobiana (Whitney, 1969), para expresar las velocidades articulares $\dot{\mathbf{q}}$ en función de las velocidades de la tarea $\dot{\mathbf{x}}$. No obstante, este enfoque no asegura la evasión de singularidades cinemáticas, como comprobaron Baillieul et al. (1984). Nakamura and Hanafusa (1986) y Wampler (1986) propusieron emplear un enfoque de mínimos cuadrados amortiguados para resolver la CI, lo que resulta en una Jacobiana no singular en todo el espacio de trabajo.

El aumento del espacio de la tarea, propuesto en (Sciavicco and Siciliano, 1987), es otra forma de resolver el problema de la CI para robots redundantes. Añade parámetros adicionales a la tarea, que son utilizados para satisfacer restricciones adicionales. De esta forma, el vector de la tarea se aumenta hasta igualar el número de GDL del manipulador, lo que resulta en una tarea aumentada para la que el manipulador es no redundante.

Basado en el concepto del aumento del espacio de la tarea, Wenger et al. (1993) presentaron los mapas de factibilidad, que son utilizados para determinar si un manipulador es capaz de cumplir una tarea dada evadiendo obstáculos. En un trabajo posterior (Pámanes G et al., 2002), se utilizan mapas de factibilidad para planear trayectorias libres de colisiones, minimizando el cambio en un parámetro redundante. Este concepto también se expande en (Reveles et al., 2016) para planificar la trayectoria de un robot paralelo redundante mediante transiciones entre modos de trabajo. Sin embargo, la trayectoria no se planea de forma completamente autónoma, ya que se requiere que un operador seleccione una serie de puntos intermedios. En (Ferrentino and Chiacchio, 2019), se realiza una búsqueda exhaustiva en mapas de factibilidad empleando programación dinámica para encontrar la trayectoria óptima global.

En este artículo, presentamos un enfoque novedoso para la planificación de trayectorias de manipuladores redundantes, basado en la exploración de mapas de factibilidad. El método propuesto es una extensión del algoritmo Rapidly-exploring Random Trees (RRT) (LaValle, 1998), modificado para explorar los parámetros redundantes de la tarea para encontrar un camino factible en el espacio articular. Al igual que métodos similares, es capaz de considerar restricciones como límites articulares, autocolisiones u obstáculos. No obstante, en lugar de hacer una búsqueda exhaustiva para encontrar la trayectoria óptima, lo cual consumiría demasiado tiempo en mayores dimensiones, nuestro método emplea un muestreo basado en RRT para encontrar una trayectoria subóptima en el espacio de los parámetros redundantes, sacrificando optimalidad global por eficiencia computacional, lo que otorga buena escalabilidad a un mayor número de grados de redundancia.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. La Sección 2 revisa el concepto de mapas de factibilidad, el cual se emplea en la Sección 3 para proponer un algoritmo basado en RRT para la planificación de trayectorias de un manipulador redundante. En la Sección 4, el método propuesto se evalúa en un ejemplo simulado. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones extraídas y las líneas de trabajo futuras.

2. Mapas de factibilidad

La CI consiste en obtener la configuración articular \mathbf{q} de un manipulador de n GDL, a partir de una tarea \mathbf{x} de m dimen-

siones, la cual es típicamente la posición y orientación de su efector final. La cinemática directa convierte la configuración articular \mathbf{q} en la posición y orientación del efector final \mathbf{x} . Para robots seriales, esta relación se puede escribir como:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (1)$$

Cuando se resuelve la CI, sería deseable poder invertir (1) y obtener $\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{x})$, que proporciona la configuración articular en función de la tarea. Sin embargo, en general, no es posible obtener una función inversa global, debido a que, normalmente, para manipuladores no redundantes ($n = m$), una única tarea \mathbf{x} tiene múltiples configuraciones articulares \mathbf{q} que la satisfacen; es decir, la función de la CI es multivaluada. El problema es mayor para manipuladores cinemáticamente redundantes ($n > m$), para los que (1) admite un número infinito de soluciones de \mathbf{q} para una tarea \mathbf{x} dada. El grado de redundancia r se define como la diferencia entre el número de GDL del manipulador y el número de coordenadas de la tarea: $r = n - m$.

Una forma de tratar este problema es utilizar un espacio de tarea aumentado, que consigue que la CI se convierta en un problema determinado y pueda ser resuelto especificando parámetros redundantes de la tarea. Para un manipulador efectuando una tarea \mathbf{x} con r grados de redundancia cinemática, la tarea aumentada \mathbf{x}_a se define como un vector de n dimensiones, para el que el manipulador se convierte en no redundante (Sciavicco and Siciliano, 1989):

$$\mathbf{x}_a = [x_1, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_{m+r}]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde \mathbf{x}_r es un vector de r dimensiones, cuyos componentes son independientes de todos los demás en \mathbf{x}_a , y puede elegirse libremente según las necesidades de la aplicación. El vector de parámetros redundantes \mathbf{x}_r está típicamente compuesto de coordenadas articulares o una función diferenciable $\mathbf{g}(\mathbf{q})$:

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (3)$$

Por ejemplo, las componentes de \mathbf{x}_r pueden ser coordenadas de posición u orientación de un punto de interés del manipulador.

En presencia de múltiples restricciones, como límites articulares u obstáculos que deban ser evadidos, el conjunto de configuraciones factibles que satisfacen la tarea deseada se puede representar en un mapa de $(r + 1)$ dimensiones. La dimensión extra corresponde a la dimensión temporal, en función de la que está definida la tarea, que suele ser la trayectoria que sigue el efector final del robot. Estos mapas se conocen como mapas de factibilidad y fueron introducidos en (Wenger et al., 1993). Un mapa de factibilidad \mathcal{FM} se define como el conjunto de puntos en el espacio $(t, x_{m+1}, \dots, x_{m+r})$, donde t es el tiempo, para los que existe una configuración articular factible; es decir, que satisface la tarea comandada y las restricciones impuestas.

Para ilustrar el concepto, se considera un manipulador planar de 3 GDL mostrado en la Figura 1, con articulaciones Rotación-Prismática-Rotación (RPR), cuyos eslabones tienen unas longitudes de $l_1 = 0,5$ y $l_2 = 1$, y cuya configuración articular viene dada por el vector $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T$. La tarea deseada $\mathbf{x} = [p_y]$ está definida por la posición de la coordenada \mathbf{Y} del efector final p_y a lo largo del tiempo t . La trayectoria deseada está descrita por la función:

$$p_y(t) = -6,66227766t^2 + 8,16227766t - 1,5 \quad (4)$$

con t en el intervalo $[0, 1]$. Este escenario resulta en un manipulador con $r = 2$ grados de redundancia cinemática para la tarea dada. Por lo tanto, la tarea aumentada se puede definir añadiendo dos parámetros redundantes al vector de la tarea \mathbf{x} . En este ejemplo, se consideran como parámetros redundantes las dos primeras articulaciones del manipulador $\{q_1, q_2\}$, resultando en el vector de la tarea aumentada \mathbf{x}_a :

$$\mathbf{x}_a = \begin{bmatrix} p_y \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} \mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_3) \\ \mathbf{x}_r = \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

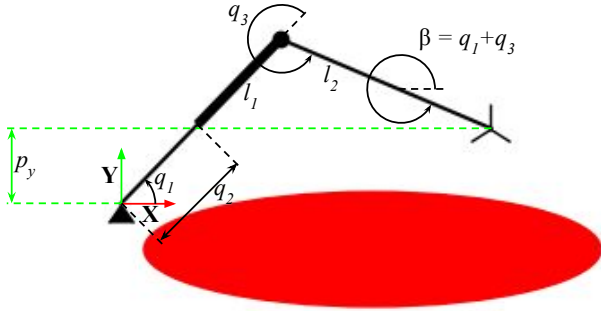


Figura 1: Manipulador RPR con un obstáculo elíptico.

Para resolver la CI, el resto de coordenadas articulares del manipulador deben ser expresadas en función de las coordenadas de la tarea aumentada. En general, esto requeriría resolver (1) y (3) a la vez. Para este ejemplo en particular, esto se reduce a resolver q_3 en función de p_y , q_1 y q_2 :

$$q_3 = \beta - q_1, \quad \text{con} \quad \beta := \arcsin\left(\frac{p_y - (l_1 + q_2) \sin(q_1)}{l_2}\right) \quad (6)$$

donde l_1 y l_2 son longitudes fijas de las barras, como muestra la Figura 1. La solución (6) es válida cuando β (la suma de los ángulos q_1 y q_3) se encuentra en el primer o cuarto cuadrante. En caso contrario, la solución sería: $q_3 = \pi - \beta - q_1$.

El entorno donde trabaja el manipulador en este ejemplo se muestra en la Figura 1. La elipse roja representa una región prohibida para el efector final, y está definida por:

$$(p_x - 1,1)^2/1^2 + (p_y - 0,2)^2/0,25^2 \leq 1 \quad (7)$$

donde p_x y p_y son las coordenadas del efector final en el sistema de referencia de la base, identificado por los ejes \mathbf{X} e \mathbf{Y} en la Figura 1. La elipse es un obstáculo con el cual el efector final no debe colisionar (p_x y p_y no deben satisfacer (7)), pero el resto del manipulador puede intersectar con ella.

La Figura 2 muestra el mapa de factibilidad obtenido para este ejemplo, que tiene 3 dimensiones. Los ejes representados corresponden a la dimensión temporal t y a los dos parámetros redundantes q_1 y q_2 del vector de la tarea adicional \mathbf{x}_r . La Figura 2 muestra varias superficies de colores, que encierran regiones prohibidas. La roja encierra configuraciones donde el efector invade la elipse definida en (7), y la morada encierra configuraciones donde la CI no tiene solución real. El mapa de factibilidad \mathcal{FM} es el volumen que excluye dichas regiones prohibidas. Cabe destacar que, aunque se han precalculado dichas regiones prohibidas para mostrarlas en la Figura 2, el algoritmo presentado en la siguiente sección no requiere precalcularlas.

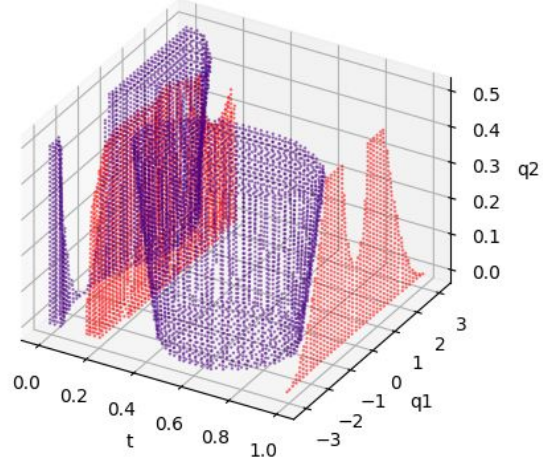


Figura 2: Mapa de factibilidad del manipulador RPR para la tarea descrita.

3. Algoritmo de planificación de trayectorias propuesto

Los mapas de factibilidad recogen todos los puntos factibles en el espacio (t, \mathbf{x}_r) que satisfacen restricciones específicas para cumplir una tarea dada. Explorando los mapas de factibilidad, es posible determinar una trayectoria continua en el espacio redundante \mathbf{x}_r a lo largo del tiempo, para una tarea descrita $\mathbf{x}(t)$ parametrizada en función de t , que típicamente representa el tiempo, o un parámetro de longitud de arco.

Una trayectoria o camino factible \mathcal{P} en el espacio redundante \mathbf{x}_r se puede establecer si existe un conjunto de puntos, conectados de forma continua, que unan la configuración inicial y una configuración deseada. En otras palabras, un camino factible $\mathcal{P} = \{\mathbf{P}_{start}, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N, \mathbf{P}_{end}\}$ se puede determinar si existe un conjunto de puntos $\mathbf{P}_i = [t_i, \mathbf{x}_r^T]$ tales que el segmentos entre \mathbf{P}_{i-1} y \mathbf{P}_i está en \mathcal{FM} para $i = 1 \dots end$, donde $t_i > t_{i-1}$, \mathbf{P}_{start} es el punto inicial y \mathbf{P}_{end} es el punto final.

Cabe aclarar que el vector de la tarea aumentada \mathbf{x}_a está definido de forma inequívoca para cada punto \mathbf{P} del mapa de factibilidad, ya que \mathbf{x}_a engloba la tarea deseada \mathbf{x} (la cual depende únicamente de t) y los parámetros redundantes \mathbf{x}_r , que, junto con t , definen el espacio dimensional del mapa de factibilidad. Por lo tanto, la configuración articular \mathbf{q} asociada a cualquier punto \mathbf{P} del mapa de factibilidad se puede calcular en cualquier momento resolviendo (1) y (3).

La planificación de trayectorias es un problema fundamental de la robótica, y existen numerosos métodos para resolverlo. Por un lado, los algoritmos basados en búsqueda de grafos, como Dijkstra, A* o sus variantes, son capaces de encontrar la solución óptima en términos de una función heurística, la cual guía la búsqueda. Sin embargo, a medida que la dimensionalidad del problema aumenta, el tiempo de cómputo se vuelve prohibitivamente largo.

Por el contrario, los algoritmos basados en muestrear el espacio de búsqueda, como Probabilistic Roadmaps (PRM) (Kavraki et al., 1996) o Rapidly-exploring Random Trees (RRT) (LaValle, 1998), pueden identificar un camino factible de forma más eficiente, independientemente de la dimensionalidad del espacio, pero no garantizan la optimalidad de la solución.

RRT es un popular algoritmo de planificación de trayectorias que explora un espacio de búsqueda dado, y construye un

árbol muestreando aleatoriamente puntos de dicho espacio y estableciendo conexiones entre sí. Empezando desde un estado inicial \mathbf{P}_{start} , el algoritmo genera un árbol \mathcal{T} añadiendo iterativamente nuevos nodos al mismo, hasta que se encuentra un camino que alcanza un estado final \mathbf{P}_{end} .

RRT fue introducido en (LaValle, 1998) como una estructura de datos aleatoria para la planificación de trayectorias en espacios de búsqueda de alta dimensionalidad. Desde entonces, se han propuesto multitud de variaciones del algoritmo original para abordar diferentes problemas. Por ejemplo, RRT-Connect (Kuffner and LaValle, 2000) extiende el algoritmo original para permitir la búsqueda bidireccional entre los puntos inicial y final. En (Bruce and Veloso, 2002), ERRT se propone para adecuar el algoritmo RRT a aplicaciones en tiempo real. Dynamic RRT (Ferguson et al., 2006) proporciona un método para replanificar la trayectoria cuando el entorno es cambiante. RRT* (Karaman and Frazzoli, 2011) y Anytime RRT (Karaman et al., 2011) son extensiones que garantizan la optimalidad de la trayectoria encontrada cuando se dispone de suficiente tiempo.

3.1. Algoritmo RRT modificado

En esta subsección, se propone un algoritmo RRT modificado, que explora los mapas de factibilidad de un robot redundante para determinar un camino factible considerando restricciones. Es una adaptación del algoritmo RRT original, con modificaciones para tener en cuenta las particularidades del problema.

La diferencia principal radica en que, en nuestra aplicación, la configuración final (\mathbf{P}_{end}) puede ser cualquiera mientras se cumpla la tarea comandada (la cual se cumplirá siempre que $t = t_{end}$). Por lo tanto, el algoritmo busca un camino factible que alcance el subconjunto objetivo $\mathcal{G} = \{[t, \mathbf{x}_r^T] \in \mathcal{FM} : t = t_{end}\}$, independientemente de la configuración final \mathbf{x}_r , la cual no es relevante mientras sea factible. De entre el conjunto de caminos factibles encontrados, el algoritmo seleccionará el que minimice una función de coste $c(\mathbf{P})$, la cual será definida más adelante.

Además, a diferencia de la mayoría de algoritmos basados en RRT (Noreen et al., 2016), el algoritmo propuesto hace la planificación de forma online. Es decir, el algoritmo no depende de un mapa predefinido del espacio de búsqueda, sino que el mapa se construye a medida que se explora el espacio. El Algoritmo 1 muestra el pseudocódigo del algoritmo propuesto. En la Figura 3 se ilustran los pasos más importantes del código, que serán descritos a lo largo de los siguientes párrafos.

Algoritmo 1: Algoritmo RRT modificado.

```

1  $\mathcal{T} \leftarrow$  InicializarArbol( $\mathbf{P}_{start}$ )
2 para  $i = 1, 2, \dots, i_{max}$  hacer
3    $\mathbf{P}_{rand} \leftarrow$  NodoAleatorio
4    $\mathbf{P}_{parent} \leftarrow$  MejorPadre( $\mathbf{P}_{rand}$ )
5   si condiciones (C1), (C2) y (C3) entonces
6     Añadir nodo  $\mathbf{P}_{rand}$  con padre  $\mathbf{P}_{parent}$  a  $\mathcal{T}$ 
7      $\mathbf{P}_{ext} \leftarrow$  ExtendPath( $\mathbf{P}_{parent}, \mathbf{P}_{rand}$ )
8     si condiciones (C2) y (C3) entonces
9       añadir nodo  $\mathbf{P}_{ext}$  con padre  $\mathbf{P}_{rand}$  a  $\mathcal{T}$ 
10  $\mathcal{P}_{best} \leftarrow$  MejorCamino( $\mathcal{T}, c(\mathcal{P})$ )
11  $\mathcal{P}_{smooth} \leftarrow$  SuavizarCamino( $\mathcal{P}_{best}$ )
12 devolver  $\mathcal{P}_{smooth}$ 
    
```

El algoritmo comienza inicializando el árbol \mathcal{T} con el estado inicial \mathbf{P}_{start} . El árbol es una estructura de datos que establece

una relación jerárquica entre sus nodos, cada uno de los cuales corresponde a un estado o punto $\mathbf{P} \in \mathcal{FM}$. Cada nodo puede tener varios descendientes pero solo un padre. El nodo inicial \mathbf{P}_{start} es la raíz del árbol y no tiene padre.

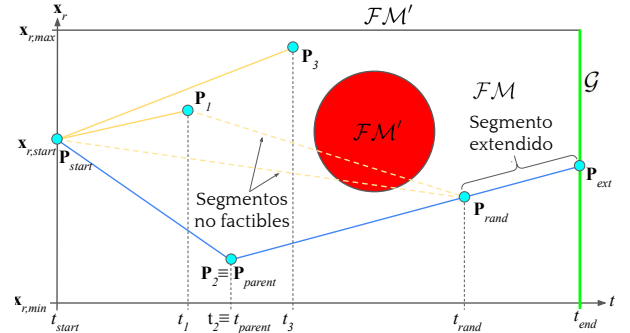


Figura 3: Algoritmo RRT modificado, donde \mathcal{FM}' es el complemento de \mathcal{FM} .

A continuación, el algoritmo itera i_{max} veces, donde i_{max} es un número máximo de iteraciones predefinido. En cada iteración, se genera un nodo aleatorio \mathbf{P}_{rand} , garantizando su factibilidad al estar contenido en \mathcal{FM} . El algoritmo busca el mejor padre \mathbf{P}_{parent} para el nodo aleatorio \mathbf{P}_{rand} (explicaremos seguidamente qué significa ser el mejor padre).

El proceso de búsqueda del mejor padre debe respetar la condición de que el tiempo es estrictamente monótono creciente, por lo que la coordenada de tiempo t del nodo aleatorio \mathbf{P}_{rand} debe ser mayor que la de su padre \mathbf{P}_{parent} ($t_{parent} < t_{rand}$). La búsqueda se ejecuta hacia adelante en la dimensión del tiempo, comenzando desde el nodo raíz, hasta que se encuentra un nodo \mathbf{P}_{parent} tal que se cumplen 3 condiciones: (C1) $t_{parent} < t_{rand}$, (C2) el segmento entre \mathbf{P}_{parent} y \mathbf{P}_{rand} pertenece completamente a \mathcal{FM} (es decir, no interseca con regiones prohibidas), y (C3) se cumplen otros requisitos, que pueden ser especificados dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, un requisito especificado puede ser que, cuando alguna componente de \mathbf{x}_r es q_i , su velocidad \dot{q}_i esté acotada:

$$\dot{q}_{i,min} \leq \frac{q_{i,rand} - q_{i,parent}}{t_{rand} - t_{parent}} \leq \dot{q}_{i,max} \quad (8)$$

donde t_j y $q_{i,j}$ son coordenadas del nodo \mathbf{P}_j .

La tarea del algoritmo más exigente computacionalmente es verificar la condición (C2) (si el segmento entre ambos nodos está contenido en \mathcal{FM}). Debido a que el mapa de factibilidad no está precalculado, la verificación debe realizarse online. La factibilidad del segmento entre \mathbf{P}_{parent} y \mathbf{P}_{rand} se comprueba discretizándolo con una resolución preestablecida en el eje t , y verificando si cada punto discretizado pertenece a \mathcal{FM} . Para acelerar el proceso, los puntos discretizados se comprueban en orden aleatorio siguiendo una distribución uniforme continua. De esta forma se aumenta la probabilidad de identificar un punto no factible en el segmento de forma temprana y resulta en un rechazo más rápido del segmento en caso de que sea inválido. Si el segmento se considera válido, se añade el nodo \mathbf{P}_{rand} con padre \mathbf{P}_{parent} al árbol y se extiende el segmento.

El proceso de extensión consiste en extender el segmento previamente verificado entre \mathbf{P}_{parent} y \mathbf{P}_{rand} , hasta un nodo extendido \mathbf{P}_{ext} , que corresponde a la intersección entre dicho segmento extendido y el subconjunto objetivo \mathcal{G} . El segmento en-

tre \mathbf{P}_{rand} y \mathbf{P}_{ext} también debe ser verificado, comprobando las condiciones (C2) y (C3) de la forma explicada (no es necesario comprobar (C1) puesto que $t_{ext} = t_{end}$). Si el segmento extendido es factible, se añade el nodo \mathbf{P}_{ext} con padre \mathbf{P}_{rand} al árbol, encontrando así un camino factible completo \mathcal{P} .

En la Figura 3, se muestra una iteración del algoritmo en un escenario de ejemplo donde el mapa de factibilidad está acotado por t_{start} y t_{end} en la dimensión del tiempo, $\mathbf{x}_{r,min}$ y $\mathbf{x}_{r,max}$ en la dimensión de los parámetros redundantes, y una región roja que representa un obstáculo. En la iteración del instante mostrado, el árbol contiene cuatro nodos: \mathbf{P}_{start} , \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 , y \mathbf{P}_3 .

En la iteración mostrada, se genera el nodo aleatorio \mathbf{P}_{rand} y se busca el mejor padre \mathbf{P}_{parent} . El segmento entre \mathbf{P}_{start} y \mathbf{P}_{rand} se comprueba primero, y se rechaza al cruzar la región roja, que no pertenece a \mathcal{FM} . El resto de nodos se comprueban en el orden determinado por t , hasta que \mathbf{P}_2 se identifica como el mejor padre \mathbf{P}_{parent} . Cabe destacar que, en el momento que se identifica \mathbf{P}_2 como el mejor padre, \mathbf{P}_3 aún no ha sido comprobado, puesto que $t_3 > t_2$. A continuación, el segmento entre \mathbf{P}_{parent} y \mathbf{P}_{rand} se extiende hasta $\mathbf{P}_{ext} \in \mathcal{G}$, y se comprueba su factibilidad, resultando en un camino completo \mathcal{P} , que conecta \mathbf{P}_{start} y \mathcal{G} .

Cuando se alcanza el número máximo de iteraciones i_{max} , el algoritmo evalúa el árbol y elige, de entre todos los caminos completos encontrados, el mejor camino \mathcal{P}_{best} , empleando una función de coste $c(\mathcal{P})$. Esta función evalúa el coste del camino \mathcal{P} , y puede ser elegida para cada problema en particular. Por ejemplo, una elección sencilla sería minimizar la suma de la norma ponderada de los segmentos que forman cada camino:

$$c(\mathcal{P}) = \sum_{i=1}^{end} \sqrt{(\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i-1})^T \mathbf{W} (\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i-1})} \quad (9)$$

donde \mathbf{W} es una matriz diagonal de pesos w_i .

Debido a la naturaleza del algoritmo, el camino devuelto es poligonal, lo que implica velocidades discontinuas y aceleraciones infinitas. Para suavizar el camino, se interpola el mejor camino \mathcal{P}_{best} con una interpolación con B-splines cúbicos (grado 3) (De Boor and De Boor, 1978).

Dado un camino $\mathcal{P} = \{\mathbf{P}_{start}, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N, \mathbf{P}_{end}\}$, formado por el nodo inicial, final, y una serie de N nodos, se establece un conjunto de puntos de control C a lo largo del camino:

$$C = \{^1C_1, ^1C_2, \dots, ^1C_{N_c}, ^2C_1, ^2C_2, \dots, ^2C_{N_c}, \dots\} \quad (10)$$

donde N_c es el número de puntos de control por segmento (por ejemplo, desde \mathbf{P}_{start} hasta \mathbf{P}_1). El punto de control iC_j es el j -ésimo punto de control del segmento i -ésimo que forma el camino \mathcal{P} . Los puntos de control en cada segmento están espaciados regularmente. La notación seguida, los puntos de control resultantes y el camino suavizado devuelto se muestran en un ejemplo en la Figura 4.

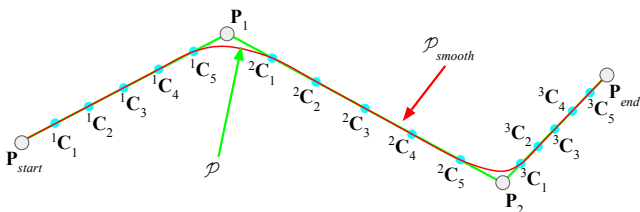


Figura 4: Suavizado \mathcal{P}_{smooth} (en rojo) del camino \mathcal{P} (en verde), con $N_c = 5$.

4. Simulaciones

Para validar el algoritmo propuesto, se ha simulado el escenario mostrado en la Figura 1, donde se requiere que el efector final del manipulador RPR siga la trayectoria en la coordenada \mathbf{Y} definida por (4), mientras se evita posicionar el efector final dentro del obstáculo elíptico rojo definido en (7). La configuración inicial es $\mathbf{q} = [-0,6984 \text{ rad}, 0,5 \text{ m}, -0,331 \text{ rad}]^T$.

Las articulaciones del manipulador están restringidas en el intervalo $[-2\pi, 2\pi]$ rad para q_1 y q_3 (lo cual permite *wrapping* del ángulo en $\pm\pi$), y $[0, 0,5]$ m para q_2 . Además, se ha impuesto una restricción en la velocidad máxima de las articulaciones de 13 rad/s y 0,2 m/s para q_1 y q_3 , y q_2 , respectivamente. La ecuación (9) se emplea como función de coste $c(\mathcal{P})$, con una matriz de pesos identidad $\mathbf{W} = \mathbf{I}$.

El algoritmo se ejecuta con un número máximo de i_{max} iteraciones, lo que significa que se generarán i_{max} nodos aleatorios, sin contar los nodos extendidos. Para el suavizado del camino, se emplean $N_c = 6$ puntos de control, por segmento del camino completo, para la interpolación con B-splines.

Las simulaciones se han realizado en Python, con un procesador Intel(R) Core(TM) i5-10400 CPU @ 2.90GHz. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para diferentes valores de i_{max} (seleccionados arbitrariamente para representar el espectro completo), promediados a lo largo de 500 simulaciones para cada i_{max} . Se puede observar que el algoritmo presenta una tasa de fallo cuando se generan pocos nodos. La tasa de fallo es la probabilidad de que el algoritmo no encuentre un camino factible, lo cual deja de suceder a partir de $i_{max} = 1600$.

Tabla 1: Tiempos, costes, y tasas de fallo para diferentes i_{max}

i_{max}	Tiempo ejecución (s)	Coste $c(\mathcal{P}_{best})$	% fallo
100	0,040	5,967	73,6
500	0,230	4,743	11,2
1000	0,490	4,182	1,8
1500	0,855	3,845	0,8
2000	1,260	3,709	0
2100	1,367	3,642	0
2500	1,760	3,554	0
3000	2,300	3,480	0
3500	2,959	3,438	0

Para evaluar los resultados obtenidos y elegir el número de iteraciones i_{max} más adecuado, en la Figura 5 se ha representado el coste medio del camino obtenido frente al tiempo medio de ejecución, para diferentes valores de i_{max} (desde 100 hasta 5900, con un incremento de 100). Para seleccionar el valor de i_{max} más adecuado, se ha buscado el punto de la curva que minimice la circunferencia que pase por dicho punto y esté centrada en el origen (en rojo en la Figura 5). De entre las configuraciones simuladas, se ha elegido $i_{max} = 2100$ como el valor más adecuado, el cual presenta un buen compromiso entre tiempo de ejecución y coste del camino obtenido.

Finalmente, en la Figura 6 se muestra el camino suavizado \mathcal{P}_{smooth} obtenido para el número de iteraciones elegido $i_{max} = 2100$. Se muestra el árbol \mathcal{T} generado por el algoritmo sobre el mapa de factibilidad \mathcal{FM} correspondiente. En rojo claro se muestran los caminos que no alcanzan el subconjunto

objetivo \mathcal{G} , mientras que en verde se dibujan los que sí alcanzan el objetivo. En azul se muestra el camino suavizado \mathcal{P}_{smooth} obtenido por el algoritmo. Es un camino continuo, pero en el punto \mathbf{P}_{wrap} , q_1 sufre *wrapping* de $-\pi$ a π .

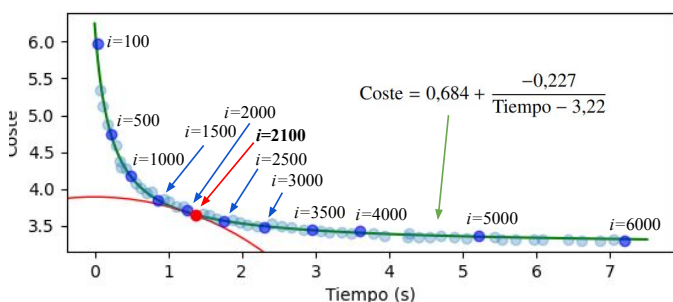


Figura 5: Coste frente a tiempo para diferentes valores de i_{max} .

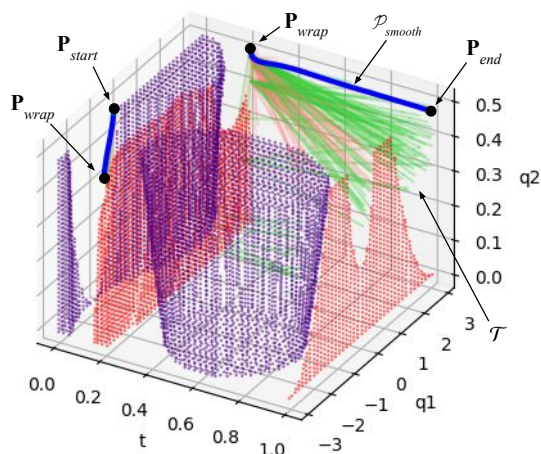


Figura 6: Árbol generado y camino suavizado obtenido por el algoritmo RRT.

5. Conclusiones

Este artículo ha presentado un algoritmo novedoso para la planificación de trayectorias de manipuladores redundantes basado en el algoritmo RRT. El método propuesto muestrea aleatoriamente puntos en el mapa de factibilidad de la tarea, sujeto a ciertas restricciones, y construye iterativamente un árbol conectando los puntos a nodos anteriores en el árbol. Los caminos que llegan al objetivo se evalúan en función de una función de coste y se selecciona el que la minimiza. El camino seleccionado se suaviza utilizando una interpolación B-spline, y se devuelve como la trayectoria a seguir por el manipulador. El algoritmo ha sido evaluado en un manipulador planar RPR y es capaz de generar caminos factibles de manera eficiente.

Trabajos futuros implicarán extender el algoritmo a manipuladores con un mayor número de grados de redundancia, lo que requerirá explorar mapas de factibilidad de mayor dimensionalidad, para los cuales las búsquedas exhaustivas del mapa requerirían una cantidad prohibitiva de tiempo. Además, se probará el método en manipuladores reales.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto PID2020-116418RB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033;

de la ayuda PRE2021-099226, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+; y del proyecto CI-GE/2021/177, financiado por la Conselleria d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital.

Referencias

- Baillieul, J., Hollerbach, J., Brockett, R., 1984. Programming and control of kinematically redundant manipulators. In: The 23rd IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, pp. 768–774.
- Bruce, J., Veloso, M., 2002. Real-time randomized path planning for robot navigation. In: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Vol. 3. IEEE, pp. 2383–2388.
- De Boor, C., De Boor, C., 1978. A practical guide to splines. Vol. 27. Springer-verlag New York.
- Ferguson, D., Kalra, N., Stentz, A., 2006. Replanning with rrts. In: Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. IEEE, pp. 1243–1248.
- Ferrentino, E., Chiacchio, P., 2019. A topological approach to globally-optimal redundancy resolution with dynamic programming. In: ROMANSY 22 - Robot Design, Dynamics and Control. Springer, pp. 77–85.
- Jin, L., Li, S., La, H. M., Luo, X., 2017. Manipulability optimization of redundant manipulators using dynamic neural networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics 64 (6), 4710–4720.
- Karaman, S., Frazzoli, E., 2011. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. The international journal of robotics research 30 (7), 846–894.
- Karaman, S., Walter, M. R., Perez, A., Frazzoli, E., Teller, S., 2011. Anytime motion planning using the rrt. In: 2011 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, pp. 1478–1483.
- Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J.-C., Overmars, M. H., 1996. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. IEEE transactions on Robotics and Automation 12 (4), 566–580.
- Kuffner, J. J., LaValle, S. M., 2000. Rrt-connect: An efficient approach to single-query path planning. In: Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065). Vol. 2. IEEE, pp. 995–1001.
- LaValle, S. M., 1998. Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning. The annual research report.
- Nakamura, Y., Hanafusa, H., 1986. Inverse Kinematic Solutions With Singularity Robustness for Robot Manipulator Control. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 108 (3), 163–171.
- Noreen, I., Khan, A., Habib, Z., 2016. Optimal path planning using rrt* based approaches: A survey and future directions. International Journal of Advanced Computer Science and Applications 7 (11).
- Pámanes G, J. A., Wenger, P., Zapata D, J. L., 2002. Motion planning of redundant manipulators for specified trajectory tasks. Advances in Robot Kinematics: Theory and Applications, 203–212.
- Reveles, D., Wenger, P., et al., 2016. Trajectory planning of kinematically redundant parallel manipulators by using multiple working modes. Mechanism and Machine Theory 98, 216–230.
- Sciavicco, L., Siciliano, B., 1987. Solving the inverse kinematic problem for robotic manipulators. In: RoManSy 6: Proceedings of the Sixth Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Springer, pp. 107–114.
- Sciavicco, L., Siciliano, B., 1989. The augmented task space approach for redundant manipulator control. In: Robot Control 1988 (Syraco'88). Elsevier, pp. 125–129.
- Siciliano, B., Khatib, O., Kröger, T., 2008. Springer handbook of robotics. Vol. 200. Springer.
- Wampler, C. W., 1986. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 16 (1), 93–101.
- Wenger, P., Chedmail, P., Reynier, F., 1993. A global analysis of following trajectories by redundant manipulators in the presence of obstacles. [1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 901–906 vol.3.
- Whitney, D. E., 1969. Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. IEEE Transactions on man-machine systems 10 (2), 47–53.
- Zhang, Y., Wang, J., 2004. Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators using a dual neural network. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics) 34 (1), 752–759.