

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

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

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

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

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

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

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

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR

Josep-Arnau Claret

Institute of Industrial and Control Engineering (IOC), UPC, Barcelona, Spain; josep.arnau.claret@upc.edu

Luis Basañez

Institute of Industrial and Control Engineering (IOC), UPC, Barcelona, Spain; luis.basanez@upc.edu

Abstract

In this paper, a new teleoperation system consisting on the integration of a mobile manipulator, an UAV, and a haptic is presented. The camera of the UAV is used to give visual feedback to the operator. An algorithm is presented to allow the operator to command both the UAV and the mobile manipulator while keeping the point of view pointing towards the robot by only using a single haptic device. The presented algorithm combines a position-position and a position-velocity workspace mapping from the haptic to the mobile manipulator and the UAV, both in position and orientation. Further, a solution is presented that takes advantage of the null space of the mobile manipulator to keep the body and the arm of the mobile manipulator from occluding its own TCP and the object it is carrying, thus easing the teleoperation task. Experimentation has been carried on the system, both in a virtual and a real scenario, showing its potential in teleoperation scenarios. Overall, a novel teleoperation system and the ongoing progress towards its implementation in real situations is presented in this work.

keywords: Teleoperation, mobile manipulator, UAVs, workspace mapping, redundancy, null space

1 INTRODUCTION

The appearance of robots has had a deep impact in modern industry, allowing for a unprecedented level of productivity and opening new possibilities. Since its beginnings, robots have been confined in closed industrial cells, mainly due to security constraints. Since then, there has been a strong interest in the robotic community to allow the robots to operate in unbounded environments. This interest has naturally led to the study of the properties of mobile manipulators.

Low-cost Unmanned Air Vehicles (UAV) have become very popular in recent years. The coordination of multiple UAVs [1] and UAV planning [2] are active areas of research. Remarkably, the combination of an UAV with a mounted camera opens a wide range of applications like exploration of disaster scenarios [3].

Unmanned Air Vehicles and mobile manipulator (MM) have been and are currently used in teleoperation tasks [4, 5]. The coordination with or without teleoperation of a ground mobile robots and UAVs can be found in the literature for multiple tasks [6, 7, 8]. Remarkably, to the author's knowledge, no work allows to command the camera of an UAV to simultaneously teleoperate a mobile manipulator.

Workspace mapping algorithms are a key component in teleoperation systems. They map the input commands of the operator, usually from a haptic device or a joystick, to the robot workspace. This mapping is usually done in the position dimension, using a mapping from the haptic position to the robot position (*position-position* mapping), a *position-linear velocity* mapping, or an hybrid mapping, and it has to account for the scaling and the unbound workspace for mobile robots [9, 10]. Dynamic point of view, which deals with the orientation, can also be found for robot teleoperation [11] and in the exploration of virtual environments [12].

The Jacobian null space has been widely used in the robotic community to execute multiple tasks in a robot with different levels of priority [13, 14]. Its use ranges from the most common tasks to avoid singularities and object collisions, to convey emotions to users [15].

The first contribution of this work is to present a novel position and orientation workspace mapping algorithm which allows an operator to command a mobile manipulator while simultaneously and continuously changing the point-of-view of an UAV with a mounted camera from which the operator obtains visual feedback from the scene. Second, the Jacobian null space of the mobile manipulator is studied to avoid the robot to occlude its own TCP, thus easing the teleoperation task.

The rest of this paper is organized as follows. First, Section 2 presents the mobile manipulator used in this work. Section 3 introduces the workspace mapping algorithm. The algorithm to exploit the null space of the robot is presented in Section 4. Section 5 presents the advances in the implementation. Finally, the conclusions can be found in Section 6.

2 THE BARCELONA MOBILE MANIPULATOR

The robot used in this work is the Barcelona Mobile Manipulator (BMM). The BMM consists of an omni-directional mobile platform with an arm manipulator (Fig. 1). It is composed by a main body of 138 kg and $1 \times 0.78 \times 0.708 \text{ m}^3$. The platform has three degrees of freedom: two independent translations and a rotation around the vertical axis. The arm manipulator used is a Kuka LWR 4+. It has seven degrees of freedom. Overall, the BMM has ten degrees of freedom. EtherCat is used to control the wheels while Orocos is used for the high level control in a Linux Xenomai environment over a PC with four Intel Core i5 CPUs at 3.1GHz. For further details on the platform see [16].

As ultimately it is intended to implement the proposed approach to teleoperate the BMM while the camera of a Parrot AR.Drone is sending the video of the scene to the operator, the kinematic model of the BMM has been in this work. The first steps towards this goal can be found in [17].

Inverse kinematics

The algorithm to command the TCP is presented following [18]:

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} = J^+ \begin{bmatrix} \dot{p}_{si}^s + K_P e_p \\ L^{-1} (L^T \omega_{si}^s + K_O e_o) \end{bmatrix} \quad (1)$$

where:

- $e_p = p_{si}^s - p_r^s$.
- $e_o = \frac{1}{2} [n_R(q) \times n_D + s_R(q) \times s_D + a_R(q) \times a_D]$; with n , s , and a the columns of $R = R_r^s$ and $D = R_{si}^s$.
- $L = -\frac{1}{2} [S(n_D)S(n_R) + S(s_D)S(s_R) + S(a_D)S(a_R)]$.

where $S(\cdot)$ is the cross product matrix.

Once q is obtained by integrating \dot{q} , $T_r^s(q)$ can be computed using the direct kinematics. This algorithm allows a real time tracking of the robot TCP, both in position and orientation.

The computation of T_{si}^s to obtain p_{si}^s and R_{si}^s is presented in the next Section.

3 THE TELEOPERATION SYSTEM

3.1 OVERVIEW

Multiples frames need to be defined in this work prior to the introduction of the workspace mapping algorithm (Fig. 2): mo , the master inertial frame, a.k.a., the frame of the origin of the workspace of the haptic; mi , the frame of the tip of the haptic device; s , the inertial



Figure 1: The Barcelona Mobile Manipulator.

frame at the remote side, a.k.a., the mobile manipulator workspace frame; so , the frame of the origin of the haptic workspace in the remote inertial frame; si , the frame of the haptic tip in the remote inertial frame; c , the frame attached to the free-flying camera; and r , the robot end-effector frame.

Given an homogeneous transformation matrix $T_i^j \in SE(3)$, composed of a rotation matrix and a translation, $R_i^j \in SO(3)$ and $p_i^j \in \mathfrak{R}^3$, respectively, which expresses the frame i w.r.t. the frame j , $T_i^j \in SE(3)$ can be used to represent a position vector expressed in a frame i into a new frame j .

During a teleoperation task, T_{mi}^{mo} contains the information of the operator command to the system through the haptic. p_{mi}^{mo} is scaled by $K_S = \text{diag}(k_{S_X}, k_{S_Y}, k_{S_Z})$ as $p_{si}^{so} = K_S p_{mi}^{mo}$. The scales need to be adjusted separately depending on the X , Y or Z dimension. This is convenient because it allows the adjustment between the workspace of the haptic and the manipulator. T_{si}^{so} corresponds to the input of the user from the haptic in the MM workspace and is composed of a translation and a rotation, $K_S p_{mi}^{mo}$ and R_{mi}^{mo} , respectively.

Given that $T_{si}^s = T_{so}^s T_{si}^{so}$ it follows that:

$$\begin{aligned} p_{si}^s &= p_{so}^s + R_{so}^s K_S p_{mi}^{mo} \\ R_{si}^s &= R_{so}^s R_{mi}^{mo} \end{aligned} \quad (2)$$

From Fig. 2 it can also be noted that:

$$T_c^s = T_{so}^s T_c^{so} \quad (3)$$

where T_c^{so} is a constant transformation that couples the frames c and so .

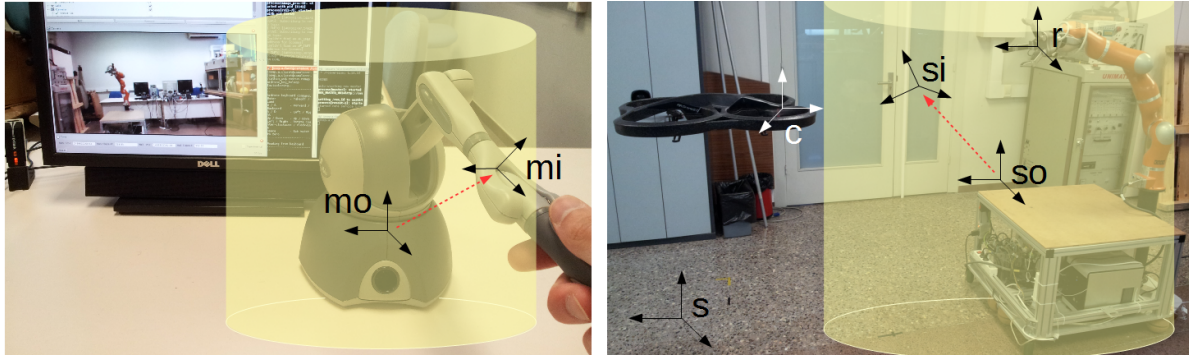


Figura 2: The teleoperation system. Left: The haptic and the screen with visual feedback from the UAV. Right: The haptic workspace (in yellow) is mapped into the workspace of the robot. Red arrows depict the user command.

Finally, T_r^s is obtained from the computation of the MM inverse kinematics (Sect. 2).

3.2 ADOPTED APPROACH

The proposed approach extends the solution presented in [19] to a mobile manipulator. But in this work the technique is also applied to the orientation by using a free-flying camera.

3.2.1 The position mapping

W.r.t. the position, when the user commands the tip of the haptic device *inside* the mobile manipulator TCP is commanded using a *position-position* mapping between the haptic tip position and the robot TCP. When the boundary of the haptic workspace, roughly defined as a thick frontier containing the external workspace boundary, is reached, a *position-linear velocity* component is added to the previous *position-position*. This combination of inputs allows the user to command the TCP of the mobile manipulator in an unbounded workspace through the bounded workspace of the haptic device.

A "cylindric bubble" is used as haptic workspace to adapt the solution in [19] to the workspace of mobile manipulator (Figs. 2-3): the Z position is commanded by a *position-position* map (Eq. 2) and the *position-linear velocity* is activated in the XY plane when the distance from the haptic tip to the Z axis of the frame mo , D_V , is higher than a predefined radius R_V . Formally this can be expressed as:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{so}^s &= \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) k_V u_{siXY}^s = \\ &= \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) k_V R_{so}^s K_S u_{miXY}^{mo} \end{aligned} \quad (4)$$

with $k_V > 0$, the maximum allowed velocity; u_{miXY}^{mo} , the unit vector of $p_{miXY}^{mo} = [p_{miX}^{mo}, p_{miY}^{mo}, 0]^T$; and $D_V = \|p_{miXY}^{mo}\|$. The term $(1 - R_V/D_V)$ allows for increasing velocities from zero ($D_V = R_V$) to the maximum defined in k_V ($D_V \rightarrow \infty$). Thus, the farther away

the haptic tip is from the vertical axis at its workspace, the fastest the MM will move in the same direction.

Differentiating, translation in Eq. 2 and Eq. 4 can be unified:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{si}^s &= \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) K_V R_{so}^s K_S u_{miXY}^{mo} \chi_{[R_V, \infty)}(D_V) + \\ &+ R_{so}^s K_S \dot{p}_{mi}^{mo} \end{aligned} \quad (5)$$

where $\chi_C(x)$ is the indicator function.

Additionally, in order for the operator to feel that he has entered in the *position-linear velocity* area, a force F can be applied to the user, with the force pointing towards the haptic workspace Z axis, and proportional to the distance from the Z axis:

$$F = -k_f^V R_{so}^s (K_S u_{miXY}^{mo} - K_d \dot{u}_{miXY}^{mo}) \chi_{[R_V, \infty)}(D_V)$$

with:

$$k_f^V = \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) K_f$$

Note that a damping has been added in the previous expression. The purpose of this it to prevent the platform from moving if the user releases the haptic tip.

3.2.2 The orientation mapping

The free-flying-camera allows the operator to use the *position-linear velocity* mode on the orientation, enabling an *orientation-angular velocity* map.

The *orientation-angular velocity* control is activated when the haptic orientation surpasses a predefined boundary. This boundary can be defined using the ZYX intrinsic Euler angles as:

$$R_{mi}^{mo} = \begin{pmatrix} c_\beta c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ c_\beta s_\gamma & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma \\ -s_\beta & s_\alpha c_\beta & c_\alpha c_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

with $s_a = \sin a$ and $c_a = \cos a$. The Euler angles can be retrieved as $\alpha = \text{atan2}(r_{32}, r_{33})$, $\beta = \text{atan2}(r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$ and $\gamma = \text{atan2}(r_{21}, r_{11})$.

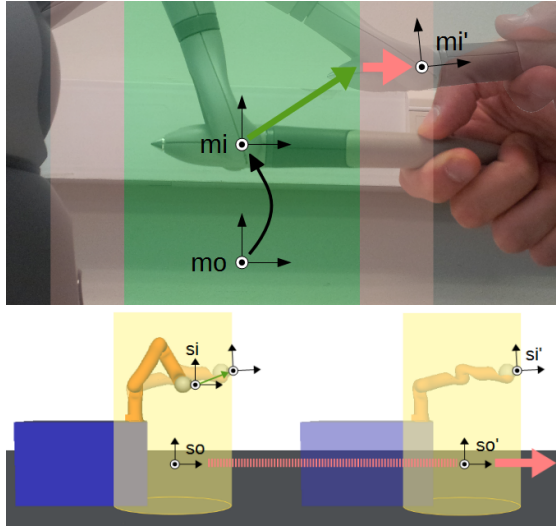


Figura 3: Position mapping. Top figure: in the green area the haptic position is mapped to a translation in the haptic workspace in the scenario (yellow volume in the bottom figure). Bottom figure: in the pink area (boundaries of the haptic workspace) the position is also mapped to the linear velocity and a gross motion on the platform is generated.

The *orientation-angular velocity* gets active when $|\beta| > \beta_B$ and $|\gamma| > \gamma_B$. Next, the frame R_{so}^s is rotated around \hat{Z} , the vertical axis, according to the rotation direction specified by the user. The angular velocity is proportional to the amount of penetration of the user into the *orientation-angular velocity* zone (Fig. 4, pink area) inside the workspace of the haptic.

By differentiating the equation in Eq. 2 the equation $\omega_{si}^s = \omega_{so}^s + R_{so}^s \omega_{si}^{so}$ is obtained, with each ω corresponding to an angular velocity. Then the *orientation-angular velocity* mode can be imposed with:

$$\omega_{so}^s = \text{sign}(\gamma) k_R \left(1 - \frac{\gamma_B}{|\gamma|}\right) \hat{Z} \chi_{[\gamma_B, \infty)}(\gamma)$$

From Eq. 3, T_c^s can be obtained by updating p_{so}^s and R_{so}^s .

3.3 SUMMARY

Summarizing the algorithm can be presented as:

1. $p_{miXY}^{mo} = [p_{miX}^{mo}, p_{miY}^{mo}, 0]^T$
2. $D_V = \|p_{miXY}^{mo}\|$
3. if $D_V > R_V$:

$$p_{so}^s = p_{so}^s + \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) k_V R_{so}^s K_S \frac{p_{miXY}^{mo}}{D_V} \Delta t$$
4. $\beta = \text{atan2}(r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$
 $\gamma = \text{atan2}(r_{21}, r_{11})$

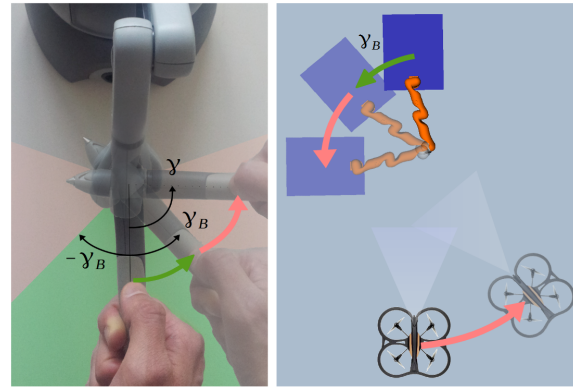


Figura 4: Rotation mapping. The haptic orientation around the Z axis in the green area is mapped to the camera orientation. In the pink area the orientation is also mapped to an angular velocity.

5. if $|\beta| > \beta_B$ and $|\gamma| > \gamma_B$:

$$R_{so}^s = \left[I + \text{sign}(\gamma) k_R \left(1 - \frac{\gamma_B}{|\gamma|}\right) S(\hat{Z}) \Delta t \right] R_{so}^s$$

6. $T_{si}^s = (p_{so}^s + R_{so}^s K_S p_{mi}^{mo}, R_{so}^s R_{mi}^{mo})$

7. $T_c^s = T_{so}^s T_c^{so}$

4 EXPLOITING THE NULL SPACE

This particular configuration between a mobile manipulator, a haptic, and a UAV which gives visual feedback to the operator opens new possibilities.

For instance, the high degree of redundancy of the mobile manipulator can be exploited to improve the user experience and to ease the teleoperation task. The Jacobian null space is an elegant and well known framework to exploit the redundancy of a robotic system [13, 14].

In this work, the null space has been exploited to allow the operator to have a better view of the TCP of the robot and thus the object it is carrying. This is done by minimizing the chances that the robot body and arm intersect the line of sight of the operator.

With this approach, the first task of the robotic system is set to track the TCP and to rotate the camera as explained in the workspace mapping algorithm, while the robotic redundancy is exploited to keep the links and the platform of the robot away from the line that goes from the robot TCP to the focal point as a secondary task.

The two tasks stated above implemented in our robotic system can be formalised by extending the solution in Eq. 1 using the null space as:

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + N \dot{q}_0 \quad (7)$$

with the null space projection operator $N = I - J^+ J$ and \dot{q}_0 containing the joint velocity that keeps the

robot away from occluding the TCP object from the user sight, as explained next.

4.1 THE OBJECT BEST VIEW APPROACH

To compute \dot{q}_0 it is necessary to define a function that carries the information of the object and the camera, and that outputs the robot motion required to maximize some object view quality measure. To do so, the object best view task can be implemented using the force field formulation, in a similar way as a joint limit avoidance task.

With the force field formulation, an *escape* velocity in the Cartesian space is generated to be applied to the point of the robot which position is between the object and the operator and which position in the image is closest to the object position in the image plane.

The main idea is to compute the distance *in the image* between the projected TCP and each of the links of the robot and the platform. With this approach, some advantage can be obtained by previously discarding those links that are behind the TCP, as they won't pose any problem for the operator task.

From the set of computed distances, the smallest is selected and, if it is lower than a predefined threshold, it is considered that the teleoperated object is occluded by the corresponding robot link. Next, the escape velocity is computed parallel to the image plane and moving the link away from the TCP.

Following, the described algorithm is presented in a more formal way.

1. For each link $i = 1, 2, 3$, the points p_i^H are computed where:

- p_1^H is at the centre of the platform surface.
- p_2^H is the intersection of the links 1 and 2.
- p_3^H is the intersection of the links 3 and 4.

A set P_H is then constructed: $P_H = p_1^H, p_2^H, p_3^H$.

2. The p_i^H that are not between the TCP and the image plane are removed from P_H , that is, if

$$(p_{1,xy}^H - p_{TCP,xy})^T n_{CAM,xy} > 0$$

where:

- a_{XY} is the projection of vector a in the XY -plane.
 - p_{TCP} is the position of the mobile manipulator TCP.
 - n_{CAM} is the normal vector of the image plane, pointing towards the TCP.
3. p_{TCP} is transformed to the camera image plane reference frame, as the remaining points in P_H , obtaining c_{TCP} , and c_i^H , respectively.

4. For each point c_i^H :

- (a) For each link the point c_i^L is computed, which corresponds to the projection of the previous point in the robot structure, projected in the image plane.
- (b) The point, c_i^* , in each link i which is closest to the TCP in the image plane is computed as $c_i^* = c_i^L + \lambda_i n_i$, with $n_i = c_i^H - c_i^L$, easily obtained with the λ_i that minimizes the squared distance

$$\left(\frac{c_{ix}^L + \lambda_i n_{ix}}{c_{iz}^L + \lambda_i n_{iz}} - \frac{v_{TCP_x}}{v_{TCP_z}} \right)^2 + \left(\frac{c_{iy}^L + \lambda_i n_{iy}}{c_{iz}^L + \lambda_i n_{iz}} - \frac{v_{TCP_y}}{v_{TCP_z}} \right)^2$$

and with v_{TCP} as the vector from the image focal point to the TCP of the mobile manipulator, p_{TCP} .

- (c) If the distance $d_i = \|c_i^* - c_{TCP}\| < \varepsilon_i$ the point c_i^* is retained, as it is occluding the TCP, and, thus, the teleoperated object.

5. The c_i^* with the smallest d_i is selected, that is, $c_i^m = \min_d(c_i^*)$.

6. The *escape* velocity, v_{esc} , is computed as: v_{esc} is applied to p_i^* , the point corresponding to c_i^* in the world frame at the third priority level. Thus the intermediate Jacobian $J_2 = \partial c_i^* / \partial q$ is computed in position as the linear interpolation (interpolating with λ_i) of the Jacobians of p_{i-1}^H and p_i^H , and with the orientation part of the Jacobian of p_{i-1}^H .

Finally, \dot{q}_0 can be computed as $\dot{q}_0 = J_2^+ v_{esc}$, and fed into Eq. 7.

4.2 IMPLEMENTATION

Considering the implementation of the presented robotic system, a Sensable Phantom Omni has been used as the haptic device. The UAV used has been the Parrot AR.Drone. The main algorithm, that is, the workspace mapping and the computation of the null space inputs, has been computed in an Intel Core i7 at 2.80GHz with Debian OS. The software has been implemented in C++.

The ROS framework has been used to integrate the different components of the system, mainly the haptic, the UAV, the BMM, and the workspace mapping. The nodes containing the haptic drivers and the workspace mapping, and the node to command the UAV have been executed in the main computer.

The input obtained from the haptic node is fed to the workspace mapping algorithm. The components obtained from this node are then processed in a manager node that generates the input signals to the free-flying camera, the Parrot AR-Drone, and to the mobile manipulator, the BMM, divided in to the commands of the



Figura 5: A scenario with a teleoperation task. The task is visualized in a virtual scenario.

platform and to the Kuka LWR. Optionally, the Kaupham Project [20] has been configured to visualize the system in a virtual environment 5.

With this setup, several experiments have been done to test the system, initially solely in the virtual environment, and lately also in real situations.

5 CONCLUSIONS

A new robotic system that integrates a mobile manipulator, an UAV and a haptic device is presented. This system allows the teleoperation of the mobile manipulator using the visual feedback of the UAV camera.

An algorithm is presented that allows the operator to command the TCP of the mobile manipulator and the orientation of the UAV with respect to the robot using solely the haptic.

The Jacobian null space of the robot is exploited to ease the teleoperation task by avoiding the robot own occlusions as a secondary task.

The implementation setup of the proposed solution in the real system is presented.

Future work will also address a gross control of the UAV, and the integration of the proposed solution in a stack of tasks with a higher number of prioritized tasks.

Acknowledgments

*This work was partially supported by the Spanish Government through the projects DPI2013-40882-P, DPI2014-57757-R and DPI2016-80077-R, and the predoctoral grants BES-2012-054899.

Bibliografía

- [1] L. Merino, F. C. and J. R. Martínez-de Dios, J. Ferruz, and A. Ollero, "A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires," *Journal of Field Robotics*, vol. 23, pp. 165–184, 2006.
- [2] L. Lin and M. A. Goodrich, "UAV intelligent path planning for wilderness search and rescue," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 709–714, Oct 2009.
- [3] S. M. Adams and C. J. Friedland, "A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management," in *Ninth International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response*, 2011.
- [4] D. Lee, C. Ha, and Z. Zuo, "Backstepping control of quadrotor-type UAVs and its application to teleoperation over the Internet.," in *IAS (2)* (S. Lee, H. Cho, K.-J. Yoon, and J. Lee, eds.), vol. 194 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 217–225, Springer, 2012.
- [5] J. Park and O. Khatib, "A haptic teleoperation approach based on contact force control.," *I. J. Robotic Res.*, vol. 25, no. 5-6, pp. 575–591, 2006.
- [6] H. G. Tanner, "Switched UAV-UGV cooperation scheme for target detection," in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pp. 3457–3462, April 2007.
- [7] R. Rao, V. Kumar, and C. Taylor, "Visual servoing of a UGV from a UAV using differential flatness," in *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ In-*

- ternational Conference on*, vol. 1, pp. 743–748 vol.1, Oct 2003.
- [8] K. E. Wenzel, A. Masselli, and A. Zell, “Automatic take off, tracking and landing of a miniature UAV on a moving carrier vehicle,” *J. Intell. Robotics Syst.*, vol. 61, pp. 221–238, Jan. 2011.
- [9] M. Frejek and S. B. Nokleby, “A methodology for tele-operating mobile manipulators with an emphasis on operator ease of use,” *Robotica*, vol. 31, pp. 331–344, 5 2013.
- [10] F. Conti and O. Khatib, “Spanning large workspaces using small haptic devices,” in *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 183–188, March 2005.
- [11] A. Pérez and J. Rosell, “An assisted re-synchronization method for robotic teleoperated tasks,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 886–891, May 2011.
- [12] C. Ware and S. Osborne, “Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments,” *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 24, pp. 175–183, Feb. 1990.
- [13] A. Liégeois, “Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms,” *IEEE Trans Syst, Man, Cybern, Syst*, vol. 7, pp. 868–871, Dec 1977.
- [14] B. Siciliano and J.-J. Slotine, “A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems,” in *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on*, vol. 2, pp. 1211–1216, June 1991.
- [15] J.-A. Claret, G. Venture, and L. Basañez, “Exploiting the robot kinematic redundancy for emotion conveyance to humans as a lower priority task,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 9, no. 2, pp. 277–292, 2017.
- [16] D. Clos and J. Martínez, “Plataforma Mòbil amb Rodes Esfèriques per al Robot ”Lightweight Robot 4” de Kuka Roboter,” tech. rep., Institute of Industrial and Control Engineering - Technical University of Catalonia, June 2007.
- [17] J. A. Claret, I. Zaplana, and L. Basañez, “Teleoperating a mobile manipulator and a free-flying camera from a single haptic device,” in *2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 291–296, Oct 2016.
- [18] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st ed., 2008.
- [19] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, and S. Richir, “The ”bubble” technique: interacting with large virtual environments using haptic devices with limited workspace,” in *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 639–640, March 2005.
- [20] J. Rosell, A. Pérez, A. Akbari, Muhayyuddin, L. Palomo, and N. García, “The kautham project: A teaching and research tool for robot motion planning,” in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1–8, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Sep 2014.