



.XXXVII.

JORNADAS DE AUTOMÁTICA

FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

LIBRO DE ACTAS

7, 8 y 9
SEPTIEMBRE
2016
MADRID



JA2016



Actas de las XXXVII Jornadas de Automática
7, 8 y 9 de septiembre de 2016, Madrid
ISBN: 978-84-617-4298-1
© Comité Español de Automática (CEA-IFAC)

• XXXVII •

Table of Contents

CONTROL DE LA EXPANSIÓN ISOTÉRMICA PARA CONVERSIÓN DE CALOR A TRABAJO	1
<i>Ramon Ferreiro Garcia, Jose Luis Calvo Rolle and Francisco Javier Perez Castelo</i>	
EVALUACION DE ARTEFACTOS EN UN SISTEM BMI PARA LA MEDICION DE NIVELES DE ATENCION DURANTE MOVIMIENTO CON EXOESQUELETO DE MIEMBRO INFERIOR.....	7
<i>Álvaro Costa, Eduardo Iáñez, Marisol Rodriguez-Ugarte and Jose Maria Azorin</i>	
Entrenamiento y Rehabilitación de la Marcha en Pacientes Pediátricos a través de la Plataforma Robótica CPWalker	13
<i>Cristina Bayón Calderón, Sergio Lerma Lara, Óscar Ramírez Velázquez, José Ignacio Serrano, María Dolores Del Castillo, Juan Manuel Belda Lois, Ignacio Martínez Caballero and Eduardo Rocon de Lima</i>	
Optimización global estática de sistemas de refrigeración	19
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, Manuel Gil Ortega Linares and Francisco Rodríguez Rubio</i>	
IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DEL CONDENSADOR DE UNA PLANTA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN	27
<i>David Rodríguez, José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega and Fernando Castaño</i>	
Modelado cinemático y dinámico del robot UHP en el modo de rehabilitación Wrist	35
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Iñigo Sesar</i>	
Cable Driven Robot to Simulate Low Gravity and its Application in Underwater Humanoid Robots.....	43
<i>Alejandro Rodríguez Barroso, Roque Saltarén Pazmiño, Rafael Aracil Santonja, Miguel Ángel Pérez Bayas and Cecilia García Cena</i>	
GENERACIÓN DE DATA SETS SIMULANDO DIFERENTES TIPOS DE CÁMARAS EN ENTORNOS VIRTUALES	49
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Luis Miguel Jiménez, Mónica Ballesta and Oscar Reinoso</i>	
IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY EN EL LAZO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN HELICÓPTERO COAXIAL NO TRIPULADO	57
<i>Bartomeu Rubí</i>	
TÉCNICAS DE SEGMENTACIÓN EN IMÁGENES SLAR PARA LA DETECCIÓN DE VERTIDOS DE HIDROCARBUROS	65
<i>Damián Mira, Beatriz Alacid, Pablo Gil and Fernando Torres</i>	
EXPERIMENTAL TECHNIQUES TO MEASURE HYPNOTIC LEVELS DURING SURGERY.....	73
<i>Gerardo Alfonso, Juan Albino Méndez Pérez, Rosa María Aguilar China, Jesús Torres Jorge, José Francisco Gómez González, José Antonio Rebozo Morales, María Martín Lorenzo and José Luis Calvo Rolle</i>	

INTELIGENCIA COMPUTACIONAL EMBEBIDA PARA LA SUPERVISIÓN DE PROCESOS DE MICROFABRICACIÓN	78
<i>Fernando Castaño Romero, Rodolfo E. Haber and Gerardo Beruvides</i>	
Control basado en Reset para seguimiento de consigna en el sistema de Control de Crucero Adaptativo	85
<i>Adriana Costas, Miguel Cerdeira Corujo, Antonio Barreiro Blas, Emma Delgado Romero and Alfonso Baños Torrico</i>	
MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA REALIZACIÓN DE EXPERIENCIAS DE CONTROL NO LINEAL.....	93
<i>Cristina Lampón, Ramón Costa-Castelló and Sebastián Dormido Bencomo</i>	
EXPLORACION DE ENTORNOS MEDIANTE ROBOTS AUTONOMOS BASADA EN MODELOS DE REACCION DIFUSION	100
<i>Alejandro Vazquez-Otero, Jan Faigl, Natividad Duro and Raquel Dormido</i>	
Selection of the Adequate Algorithm to Generate Plant Templates for Robust Control	107
<i>Jose Manuel Diaz, Sebastian Dormido, Joaquín Aranda and Rocio Muñoz</i>	
Una estrategia docente basada en el flipped classroom para mejorar la enseñanza de contenidos prácticos en asignaturas STEM	114
<i>Isiah Zaplana and Jan Rosell</i>	
LIBRERÍA JAVA PARA ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS LINEALES.....	121
<i>Jordi Blanch Costa and Ramón Costa-Castelló</i>	
CONTROL ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERENCIA PARA UN INVERSOR BASADO EN LCL CON SÍNTESIS DE CONTROLADOR MÍNIMA.....	129
<i>Ciro Larco Barros, Ramón Costa-Castelló and Josep M. Olm</i>	
Transcranial direct current stimulatío (tDCS) and transcranial current alternating stimulation (tACS) review	137
<i>Marisol Rodriguez-Ugarte, Nadia Sciacca, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
HACIA UN ASISTENTE ROBÓTICO QUIRÚRGICO COGNITIVO	144
<i>Irene Rivas Blanco, Maria Del Carmen López Casado, Enrique Bauzano Nuñez and Victor Muñoz Martinez</i>	
TRAJECTORY CLUSTERING FOR THE CLASSIFICATION OF EYE-TRACKING USERS WITH MOTOR DISORDERS	150
<i>Alejandro Clemotte, Harbil Arregui, Miguel Angel Velasco, Luis Unzueta, Jon Goenetxea, Unai Elordi, Eduardo Rocon, Ramón Ceres, Javier Bengoechea, Iosu Arizkuren and Eduardo Jauregui</i>	
Identificacion de las principales tipologias de nubes utilizando HOG	156
<i>Carmelina Ierardi and Manuel Arahal</i>	
Improving Local Symmetry Estimations In RGB-D Images by Fitting Superquadrics	162
<i>David Fornas, Pedro J. Sanz, Josep M Porta and Federico Thomas</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para un control de seguimiento de trayectoria ...	169
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	

ANÁLISIS DE LA FATIGA MUSCULAR EN EL BICEPS MEDIANTE UNA ARQUITECTURA DE BAJO COSTE BASADA EN ARDUINO-EHEALTH.....	177
<i>Jorge Aracil Gómez, Jose M. Azorin and Eduardo Iáñez Martínez</i>	
A NEW UPGRADING MODEL FOR DETECTING THE REACTION TO OBSTACLE APPEARANCE DURING WALKING USING EEG	184
<i>Eduardo Iáñez, Álvaro Costa, Andrés Úbeda, Marisol Rodríguez-Ugarte and Jose M. Azorin</i>	
EVALUACIÓN DE MANIPULADORES ROBÓTICOS MEDIANTE MÉTRICAS DE CALIDAD DEL AGARRE.....	190
<i>Carlos Rubert and Antonio Morales</i>	
Identificación de parámetros de colectores solares planos mediante algoritmos genéticos ...	198
<i>Manuel Garrido Satue, Manuel Gil Ortega Linares and Francisco Rodriguez Rubio</i>	
Un Nuevo Método Cooperativo Para Encontrar Personas En Un Entorno Urbano Con Robots Móviles	206
<i>Alex Goldhoorn, Anaís Garrell Zulueta, René Alquézar Mancho and Alberto Sanfeliu Cortés</i>	
Filtrado en línea de una señal basado en métodos algebraicos y su validación experimental	214
<i>Marina Pérez De La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro and Rafael Morales</i>	
Modelado borroso mediante datos de entrada-salida obtenidos con Arduino. Aplicación a una pila de combustible	222
<i>A. Javier Barragán Piña, Miguel A. Martínez Bohórquez, Francisca Segura Manzano, José Manuel Andújar Márquez and Antonio José Calderón Godoy</i>	
GENERACIÓN DE BIOSEÑALES SINTÉTICAS MEDIANTE SERIES DE FOURIER VARIANTES EN EL TIEMPO	227
<i>Jesús Escrivá Muñoz, Alejandro Galea Cazorla, Carmen González Pijuán, Montserrat Vallverdu Ferrer, Pere Caminal Magrans and Erik Weber Jensen</i>	
Integración de Comunicaciones a Nivel de Planta empleando Sistemas Ciber-físicos de Producción de Bajo Coste.....	234
<i>Marcelo V Garcia, Edurne Irisarri, Federico Pérez, Dario Orive, Marga Marcos and Elisabet Estevez</i>	
Phase Magnitude Diagram for Linear Systems with Delay	242
<i>Santiago Garrido, Fernando Martín and Luis Moreno</i>	
Diseño, construcción y control de un convertidor de potencia de cinco niveles	248
<i>Antonio Ventosa-Cutillas, Marta Gómez-Correa, Francisco Gordillo and Federico Cuesta</i>	
Planificación Estocástica de la Producción para Aceite de Oliva Virgen	256
<i>Pablo Cano Marchal, Diego Martínez Gila, Javier Gamez and Juan Gómez Ortega</i>	
Modelado de la incertidumbre en proceso de producción utilizando emborronamiento no unitario y mapas borroso cognitivos: caso de estudio del aceite del oliva virgen.....	264
<i>Pablo Cano Marchal, Christian Wagner, Javier Gamez García and Juan Gómez Ortega</i>	

Desarrollo de una aplicación para la operación local del robot manipulador POWERBALL: Powerbsim	272
<i>Jose Angel Martínez Navarro, Jose Carlos Moreno and Jose Luis Guzman</i>	
Modeling and Identification of ABE fermentation processes	278
<i>Dominik Hose, César de Prada and Gerardo Gonzalez</i>	
Diseño y uso de una paleta háptica para prácticas de teleoperación con simulink	286
<i>Juan Manuel Gandarias Palacios, Sepehr Akbari Kalhor and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
Towards omnidirectional immersion for ROV teleoperation	293
<i>Josep Bosch, Pere Ridaó, Rafael Garcia and Nuno Gracias</i>	
ESQUEMA DE INTEGRACION PARA EXPERIMENTACION REAL CON SISTEMAS ROBOTICOS BI-BRAZO	300
<i>Francisco Abiud Rojas de Silva, Carlos Arturo Rodriguez Pacheco and Raúl Suárez Feijóo</i>	
PLANTA EXPERIMENTAL PARA SUPERVISIÓN Y CONTROL DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR	308
<i>Mario L. Ruz, Sergio Fragoso, Francisco Vazquez, Rafael David Rodriguez, Fernando Morilla and Juan Garrido</i>	
MPC como estrategia de gestión energética para un vehículo híbrido eléctrico	316
<i>Mauro Carignano, Diego Feroldi, Norberto M. Nigro and Ramon Costa Castelló</i>	
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA ANTIVUELCO PARA VEHÍCULOS INDUSTRIALES	324
<i>Jesús Molina, Mario L. Ruz and Francisco Vazquez</i>	
PROPUESTA BASADA EN MODELOS PARA LA MONITORIZACIÓN REMOTA DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO	331
<i>Eduarne Irisarri, Marcelo V Garcia, Federico Pérez, Darío Orive, Elisabet Estevez and Marga Marcos Muñoz</i>	
Control Táctil Adaptable para la Manipulación de Objetos Deformables	338
<i>Angel Delgado, Carlos Alberto Jara and Fernando Torres</i>	
UWSim, un simulador submarino como herramienta educativa	346
<i>Javier Perez Soler, David Fornas, Raul Marin and Pedro J Sanz</i>	
MODELO CINEMÁTICO DE UN ROBOT HEXÁPODO CON "C-LEGS"	352
<i>Jesús Tordesillas Torres, Jorge De León Rivas, Antonio Barrientos Cruz and Jaime Del Cerro</i>	
Evaluación de un sistema de radio UWB para posicionamiento preciso de vehículos	360
<i>Antonio Ramón Jiménez Ruiz, Jorge Godoy and Fernando Seco</i>	
EXOESQUELETO ACTUADO POR SMA PARA MOVILIZACIÓN DE LA MUÑECA ..	368
<i>Dorin Sabin Copaci, Dolores Blanco, Iago Lopez Guerra, Susana Collado Vázquez and Marta Pérez de Heredia</i>	

ALINEAMIENTO 3D DESDE POSICIONES NO CERCANAS DE UN ROBOT PARA TRABAJOS EN INTERIORES A PARTIR DE IMÁGENES RGB-D.....	374
<i>Sergio Cebollada, Cristobal Parra, Miguel Juliá, Mathew Holloway, Luis Miguel Jiménez and Oscar Reinoso</i>	
DETECCION AUTOMATICA DE DIFERENCIAS ENTRE IMAGENES PARA ESTIMACION DE LA IRRITACION DE PRODUCTOS MEDIANTE HET-CAM.....	382
<i>Ignacio Perez Muñoz and Antonio Jose Sanchez Salmeron</i>	
PROTOTIPO DE VISIÓN ARTIFICIAL DE BAJO COSTE PARA DESARROLLO DE PRÁCTICAS DOCENTES.....	388
<i>José Félix González Rojo, Joan Carles Puchalt Rodríguez, Eugenio Ivorra Martínez and Antonio José Sánchez Salmerón</i>	
Identificación de Parámetros Borrosos para el Control de Suspensión Activa mediante Enjambre de Partículas.....	396
<i>Isabel Elena Herrera, Anthony Mandow and Alfonso García-Cerezo</i>	
Prácticas experimentales de control digital con elementos de bajo coste.....	402
<i>Adolf Izquierdo Borràs and Ramon Costa-Castelló</i>	
Una estrategia de control mediante observadores para la temperatura en edificio de oficinas.....	410
<i>Ruben Mascaró Palliser, Ramon Costa-Castelló and José Domingo Álvarez Hervás</i>	
Modelo dinámico para el despliegue automático de una barrera de contención de vertidos marinos.....	417
<i>Juan Jiménez, Jose Maria Girón-Sierra and Dictino Chaos</i>	
LA RESPONSABILIDAD JURÍDICA DE LOS PROGRAMADORES POR LOS DAÑOS CAUSADOS POR AGENTES AUTÓNOMOS.....	425
<i>Alejandro Zornoza</i>	
Modelar o programar en prácticas de robótica.....	432
<i>Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
ASPECTOS PRÁCTICOS DEL CONTROL DE ACTITUD DEL SATÉLITE INTA-NANOSAT-1B.....	439
<i>Segundo Esteban San Román, José María Girón-Sierra, Lorenzo Cercós Pita, Oscar Rodríguez Polo and Manuel Angulo Jerez</i>	
Optimización con incertidumbre en EcosimPro.....	446
<i>Tania Rodríguez Blanco, Daniel Sarabia Ortiz and César de Prada</i>	
Modelización simulada en tiempo real de la evolución de un incendio mediante el Método Fast Marching.....	453
<i>Adrián Barqueno, Luis Santiago Garrido and Luis Moreno</i>	
MODELO BASADO EN OPTIMIZACIÓN Y BASES DE DATOS.....	459
<i>Vicente Simón Gómez, David Muñoz de La Peña and Teodoro Alamo</i>	

GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE CÓDIGO DE APLICACIONES ROBÓTICAS MANIPULADORAS PARA EL MIDDLEWARE DE ROS	467
<i>Elisabet Estévez, Alejandro Sánchez García, Javier Gámez García and Juan Gómez Ortega</i>	
CONTROL PREDICTIVO BASADO EN DATOS	475
<i>Vicente Simón Gómez, David Muñoz de La Peña and Teodoro Alamo</i>	
INTERFAZ INTELIGENTE Y ADAPTATIVA PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD	483
<i>María Taboada, Juan Jesús Roldán and Antonio Barrientos Cruz</i>	
ENTORNO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN PARA VEHÍCULOS TIPO FORMULA STUDENT	491
<i>Iosu Erauskin, Asier Zubizarreta, Alejandro López and Alberto Parra</i>	
Control PID basado en eventos periódico para sistemas de control en red	499
<i>Ernesto Aranda-Escolástico, Carlos Rodríguez, María Guinaldo, José Luis Guzmán and Sebastián Dormido Bencomo</i>	
Formulación del problema de optimización multiobjetivo del confort en edificación sostenible	505
<i>María Del Mar Castilla Nieto, Francisco Rodríguez-Díaz, José Domingo Álvarez, Manuel Berenguel and Carlos Bordons</i>	
MODELADO Y ANÁLISIS DE MISIONES MULTI-ROBOT MEDIANTE MINERÍA DE PROCESOS	513
<i>Félix Díez, Juan Jesús Roldán and Antonio Barrientos</i>	
Introducción a la robótica con actividades de construcción, programación y competición de robots	521
<i>Francisco Andrés Candelas Herías, Fernando Torres Medina and Santiago T. Puente Méndez</i>	
MONITOREO EN LÍNEA DE LA FRECUENCIA CARDÍACA POR IMAGEN FOTOPLETISMOGRAFÍA MEDIANTE FILTRADO POR KALMAN	529
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres and Mohamed Abderrahim</i>	
DESARROLLO DE UN MÓDULO DE COMUNICACIONES PARA PROTOCOLO FINS-TCP SOBRE SERVIDOR OPC-UA	536
<i>Francisco Blanes and Andrés Benlloch Faus</i>	
Estudio inicial de un vehículo autónomo marino de superficie	544
<i>Santiago Puente, Francisco Candelas, Fernando Torres and Carlos Cano</i>	
Predicción automática de la calidad del aceite de oliva virgen empleando visión por computador sobre aceitunas a la entrada del proceso de elaboración	550
<i>Oscar Cáceres Moreno, Diego Manuel Martínez Gila, Daniel Aguilera Puerto, Javier Gamez García and Juan Gómez</i>	
SISTEMA DE CONTROL COOPERATIVO APLICADO A UNA RED DE TRÁFICO URBANO	558
<i>Antonio Artuñedo, Raúl M. Del Toro and Rodolfo Haber</i>	

UNA COMPARATIVA DE LA CIBERSEGURIDAD EN SISTEMAS DE CONTROL CRÍTICOS: SMART GRIDS E IACS	566
<i>Miguel Angel Iñigo Ulloa, Isidro Calvo and Jon Arambarri</i>	
Perfiles de Conducción mediante Procesamiento Inteligente y Árboles de Decisión.....	575
<i>Robert Perelló, Matilde Santos and Rafael Korbas</i>	
Un nuevo modelo para la conexión remota con hardware usando javascript	581
<i>Jacobo Sáenz, Francisco Esquembre, Félix J García, Luis De La Torre, José Sanchez and Sebastián Dormido Bencomo</i>	
INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES SOBRE COOPERACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS EN MEDIO ACUÁTICO	588
<i>Jose M Giron-Sierra, Segundo Esteban and Juan Jimenez</i>	
Desarrollo de un entorno colaborativo para aplicaciones de fusión.....	596
<i>Jesús Chacón, Ernesto Fabregas, Sebastian Dormido, Jesus Vega and José Sánchez Moreno</i>	
Caracterización conjunta cromática-textural en la identificación de nubes.....	602
<i>Eduardo Fernández-Cantalejo Padial and Manuel Arahal</i>	
SIMULACION DE KHEPERA IV EN V-REP	610
<i>Ernesto Fabregas, Emmanuel Peralta, Gonzalo Farias, Héctor Vargas and Sebastián Dormido</i>	
ENERGÍA OSMÓTICA: MODELADO Y SIMULACIÓN DE ÓSMOSIS POR PRESIÓN RETARDADA	616
<i>Jacobo Manuel Salamanca Parra and Fernando Tadeo</i>	
Control predictivo no lineal tolerante a fallos en una planta de tratamiento de aguas residuales.....	623
<i>Álvar Sánchez-Fernández, Mario Francisco, Maria Jesus Fuente and Pastora I. Vega</i>	
DOCENCIA EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL: LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN	631
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González and Eduardo J. Moya de La Torre</i>	
Arquitectura basada en ROS para el vehículo iCab (Intelligent Campus Automobile)	639
<i>Pablo Marín Plaza, Ahmed Hussein, Carlos Guindel Gómez, David Martín Gómez, Fernando García Fernández and Arturo de La Escalera Hueso</i>	
DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIZACIÓN DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD BASADO EN TÉCNICAS QFT	645
<i>Rocío Muñoz Mansilla, José Manuel Díaz Martínez, Dictino Chaos García, David Moreno Salinas and Joaquín Aranda Almansa</i>	
MODOS DE INTEGRACIÓN DE LABORATORIOS ONLINE EN SISTEMAS DE GESTIÓN DE APRENDIZAJE.....	653
<i>Ildefonso Ruano, Javier Gámez and Juan Gómez</i>	

OBTENCIÓN DE BARRIDOS LÁSER 3D NIVELADOS CON EL ROBOT MÓVIL ANDÁBATA EN MOVIMIENTO	661
<i>Jorge L. Martínez, Jesús Morales and Manuel Zafra</i>	
Estudio comparativo de efectos tDCS y rehabilitacion combinado con rehabilitacion con dispositivo robotico	667
<i>Santiago Ezquerro García, Irene Delegido Bernabe, Arturo Bertomeu-Motos, Luis Daniel Lledó Pérez, Rafael Puerto Manchon, Jose María Sabater-Navarro and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Autocalibración de parámetros extrínsecos de sistemas estéreo para aplicaciones de tráfico	675
<i>Basam Musleh, Jorge Beltrán, Carlos Borja Jaraquemada, Maria José Gomez-Silva, Noélia Hernández and José María Armingol</i>	
MICRO-ROBOT PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS	683
<i>Tamara Canelo, Ernesto Gambao, Alberto Brunete and Miguel Hernando</i>	
Evaluación de la arquitectura ARMv7-A para el desarrollo de HROV's eficientes.....	689
<i>Diego Centelles Beltran, Rafael Mayo Gual, Eduardo Moscoso Rubino, Raúl Marin Prades and Pedro José Sanz Valero</i>	
CONTROL DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN MEDIANTE LoopWin APLICANDO DIVERSOS MÉTODOS.....	696
<i>F. Javier García, Eduardo J. Moya, Alfonso Poncela, Alexander Curiel and Jordán Jiménez</i>	
ENTORNO AVANZADO DE CO-SIMULACIÓN PARA MANIOBRAS COOPERATIVAS ENTRE VEHÍCULOS	704
<i>Antonio Artuñedo, Jorge Godoy and Rodolfo Haber</i>	
Aprendizaje por Refuerzo con Búsqueda de Politicas: Simulacion y Aplicacion a un Sistema Electromecanico	710
<i>Jose Manuel Pastor, Henry Diaz, Leopoldo Armesto and Antonio Sala</i>	
Sistema robótico multimodal de miembro superior para interacción con entorno físicos	718
<i>Jorge Díez, Andrea Blanco, José María Catalán, Luis Daniel Lledó Pérez, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Aprendizaje de comportamientos de navegación en planificadores RRT*	724
<i>Noé Pérez-Higueras, Fernando Caballero Benítez and Luis Merino</i>	
El "Automatizado Box & Blocks Test". Sistema automático de evaluación de destreza manual gruesa	732
<i>Edwin Daniel Oña Simbaña, Alberto Jardón Huete, Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós, Alicia Cuesta Gómez, María Carratalá Tejada and Esther Monge Pereira</i>	
ROBOTS NADADORES TIPO FLAGELO BACTERIANO DE PEQUEÑAS DIMENSIONES: DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y PLATAFORMAS DE PRUEBA.	740
<i>Javier Silva García, Javier Prieto Arranz, Ines Tejado, Emiliano Pérez and Blas M. Vinagre</i>	

Control orientado a la herramienta para dispositivo asistencial en tareas que requieren capacidad de pinzado	748
<i>Edwin Daniel Oña Simbaña, Alberto Jardón Huete, Gabriel Barroso de María and Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós</i>	
OBTENCION DEL MODELO DINAMICO SIMBOLICO DE ROBOTS RAMIFICADOS UTILIZANDO GRUPOS DE LIE Y GRAFOS.....	755
<i>Juan A. Escalera, Fares Abu-Dakka, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Experiencia docente de la materia Informatica Industrial en estudios de Ingenieria	762
<i>Francisco Rodríguez, José Carlos Moreno, Maria Del Mar Castilla, Manuel Berenguel, José Luis Guzmán and Jorge Antonio Sánchez-Molina</i>	
LOCALIZACIÓN DE ROBOTS MÓVILES CON 4 GDL MEDIANTE VISIÓN OMNIDIRECCIONAL.....	770
<i>Cristobal Parra Soriano, Luis Miguel Jiménez García, Mónica Ballesta Galdeano, Óscar Reinoso García and David Valiente García</i>	
Uso de un robot social de bajo coste con personas mayores dependientes en un centro residencial	777
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Mari Carmen Pardo, Jose Luis Guzman and Jose Carlos Moreno</i>	
Planificador de Búsqueda en Tiempo Mínimo en un Sistema de Control de RPAS.....	785
<i>Sara Perez Carabaza, Eva Besada Portas, Jose Antonio Lopez Orozco and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
Cálculo de trayectorias para vehículos autónomos marinos (USV) utilizando el método Fast Marching Square sometido a campo vectorial.....	793
<i>Melchor Izquierdo, Santiago Garrido and Luis Moreno</i>	
PLANIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA DE CARGAS EN UN SISTEMA DE EVAPORADORES INDUSTRIALES	801
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch and César de Prada</i>	
MODELADO Y CONTROL DE UN VEHÍCULO SUBACUÁTICO NO TRIPULADO ...	807
<i>Francisco J. Velasco González, Elías Revestido Herrero, Francisco Javier Lastra Santos and Luis Manuel Vega Antolín</i>	
PLATAFORMA DE INSPECCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE MAPAS 2D y 3D DE UN CULTIVO	814
<i>Jose M Bengochea-Guevara, Dionisio Andújar, Jesús Conesa-Muñoz and Angela Ribeiro</i>	
Robótica móvil para el aprendizaje de conceptos de programación en tiempo real	821
<i>Carlos Rodríguez, José Luis Guzmán, Manuel Berenguel, José Carlos Moreno, Francisco Rodríguez and Sebastián Dormido</i>	
NEURO-FUZZY EN EL MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE USUARIOS-TURÍSTICOS EN EWOM	827
<i>Rosa M Aguilar, J.M. Torres, J.A. Mendez and E. Parra-Lopez</i>	

Algoritmo para la detección automática de sangrados quirúrgicos utilizando visión por computador	835
<i>Alvaro Garcia Martinez, Jose Maria Vicente Samper, Carlos Gabriel Juan Poveda and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Framework para el modelado de Interacciones Humano-Robot basadas en aprendizaje no supervisado	840
<i>Rafael Ramón-Vigo, Luis Merino and Fernando Caballero Benítez</i>	
Coordinación UAV-UGV para tareas de Búsqueda y Rescate	848
<i>Pablo Rodríguez Palafox, Mario Garzón Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
Planificación de Trayectorias para UAVs con Fast Marching Square Adaptadas a Requerimientos de Vuelo	856
<i>Veronica González Pérez, Concepción Alicia Monje Micharet, Luis Moreno and Carlos Balaguer</i>	
Control de acceso electrónico de cerraduras de barrera basado en WPA para dispositivos móviles	863
<i>Miguel Díaz-Cacho Medina, Alfonso Trigo Raposo, Emma Delgado and Matías García Rivera</i>	
DEEP LEARNING EN LA PREDICCIÓN DE GENERACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO	869
<i>Jesús Torres, Rosa M Aguilar, Juan A Méndez and K.V. Zúñiga-Meneses</i>	
RECONOCIMIENTO DE ACTIVIDADES EN EL DESPLAZAMIENTO POR INTERIORES MEDIANTE UN TELÉFONO INTELIGENTE Y SEÑALES DE OPORTUNIDAD	876
<i>Fernando Seco Granja and Antonio Ramón Jiménez Ruiz</i>	
MAS-RECON. MIDDLEWARE RECONFIGURABLE BASADO EN MULTIAGENTES ..	884
<i>Unai Gangoiti, Aintzane Armentia, Rafael Priego, Elisabet Estévez and Marga Marcos</i>	
Diseño de un motor de tareas para terapias de neurorehabilitación asistidas por robots ...	891
<i>Luis Daniel Lledó Pérez, Santiago Ezquerro García, Arturo Bertomeu Motos, José María Catalán Orts, Ramón Neco García, José María Sabater Navarro and Nicolás García Aracil</i>	
Los primeros robots manipuladores aéreos	899
<i>Anibal Ollero, Antidio Viguria, Ivan Maza, Miguel Angel Trujillo, Guillermo Heredia, Raul Cano, Fernando Caballero, Fernando Lasagni, Jose Angel Acosta, Silvia de Los Santos and Jose Antonio Cobano</i>	
MODELO NEURONAL MULTIVARIABLE DE UN SISTEMA TWIN-ROTOR.....	907
<i>Luis Ignacio Ruiz, Eloy Irigoyen, Vicente Gomez and Fernando Artaza</i>	
Influencia de la visualización en terapias de rehabilitación virtual asistidas por robots	913
<i>Luis Daniel Lledó Pérez, Santiago Ezquerro García, Francisco Javier Badesa Clemente, Ramón Neco García, José María Sabater Navarro and Nicolas García Aracil</i>	

GUIADO HÁPTICO MEDIANTE APRENDIZAJE POR DEMOSTRACIÓN EN ROBÓTICA QUIRÚRGICA	921
<i>Carlos Perez-Del-Pulgar, Isabel García-Morales and Victor Muñoz Martinez</i>	
CLASIFICADOR DE FIGURAS GEOMETRICAS TRAZADAS A MANO BASADO EN LOGICA BORROSA	929
<i>David Palomeque Mangut and J. Alvaro Fernández Muñoz</i>	
ARQUITECTURA DE COMUNICACIONES DE TIEMPO REAL PARA ROBOTS MODULARES BASADOS EN ROS.....	935
<i>Eduardo Munera, Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yague, Jose Simo and Francisco Blanes</i>	
Predictores robustos de estructura fija.....	943
<i>David Tena Tena, Ignacio Peñarrocha Alós and Roberto Sanchis Llopis</i>	
Optimización de la Vida de Baterías en Plantas Fotovoltaicas mediante Algoritmos Genéticos	949
<i>Emilio Pérez, Hector Beltrán, Carlos Ariño and J. Carlos Alfonso-Gil</i>	
Experiencias de evaluación automatizada en identificación y ajuste de PID	957
<i>Daniel Dolz Algaba, Ignacio Peñarrocha and Roberto Sanchis Llopis</i>	
Desarrollo de una herramienta de configuración asistida de Sistemas Automatizados de Prevención de Riesgos Industriales basados en Visión Artificial	963
<i>M Dolores Moreno Rabel and J. Alvaro Fernández Muñoz</i>	
Diseño basado en prestaciones de observadores PI para el diagnóstico de fallos en sistemas lineales con perturbaciones gaussianas.....	971
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha, Daniel Dolz Algaba and Roberto Sanchis Llopis</i>	
Centro de Control Versátil para Equipos de Vehículos Heterogéneos Estado Actual y Mejoras Futuras.....	979
<i>Juan A. Bonache Seco, Jose A. Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE PROCESOS DE AUTOMATIZACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/ISA-88	987
<i>Arantzazu Burgos, María Luz Alvarez, María Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Un enfoque óptimo para la distribución de energía de una micro-red usando Control Predictivo basado en Modelo (MPC): una simulación de un caso de estudio.....	995
<i>César Hernández, Francisco Rodríguez, José Carlos Moreno, Paulo Renato Da Costa Mendes and Julio Elias Normey-Rico</i>	
Real time stereoscopic vision system for obstacle detection using low cost embedded systems	1003
<i>Miguel Gilabert Gisbert, Jaime Masiá Vañó and Pau Micó Tormos</i>	
Modelado y predicción a corto plazo del consumo y producción de energía eléctrica en una micro-red utilizando métodos basados en series temporales y redes neuronales artificiales.....	1010
<i>César Hernández, Francisco Rodríguez, José Carlos Moreno, Paulo Renato Da Costa Mendes and Julio Elias Normey-Rico</i>	

DESARROLLO DE UN GENERADOR DE GASES AUTOMÁTICO CONTROLADO POR PLC	1018
<i>Javier Díaz-Pajuelo, Jesus Lozano, José Ignacio Suárez, Patricia Arroyo and Antonio José Calderón</i>	
DETECCIÓN DE CONTAMINANTES MEDIANTE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES Y RECONOCIMIENTO DE PATRONES	1024
<i>Patricia Arroyo, Jesus Lozano, José Ignacio Suarez, José Luis Herrero Agustin and Pablo Carmona</i>	
SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT CARTESIANO BASADO EN PLC	1030
<i>Jesus Lozano, Antonio José Calderón, Víctor Miñambres and Alberto Tomás Pérez</i>	
CONTROL VISUAL DINÁMICO BASADO EN FPGA DE UN ROBOT MANIPULADOR DE 6 GRADOS DE LIBERTAD	1037
<i>Aiman Alabdo, Javier Pérez, Jorge Pomares, Gabriel J. Garcia and Fernando Torres</i>	
CONTROL DE FORMACIONES DE VEHÍCULOS MARINOS DE SUPERFICIE CON RESTRICCIONES DE ENTRADA	1044
<i>Jesús Manuel de La Cruz, José Antonio López Orozco, Eva Besada Portas and Joaquín Aranda Almansa</i>	
IDENTIFICACIÓN DE DIFERENTES ZUMOS MEDIANTE NARIZ ELECTRÓNICA PORTÁTIL	1052
<i>Sara González, David Palomeque Mangut, Juan Álvaro Fernández, Jose Pedro Santos and Jesus Lozano</i>	
CONTROL DE UN ROBOT MÓVIL MEDIANTE ICC: UN ENFOQUE PRÁCTICO. ...	1059
<i>Rafael López de Ahumada, Gianluca Amitrano, Fernando Gomez-Bravo, Raúl Jiménez-Naharro and Juan Antonio Gómez Galán</i>	
MODELADO DINÁMICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT TREPADOR TIPO SERIE CON 4 GRADOS DE LIBERTAD	1067
<i>Adrián Peidro Vidal, Alba Hortal, Arturo Gil, José María Marín, David Úbeda and Óscar Reinoso</i>	
ROBOT NADADOR TIPO FLAGELO BACTERIANO PLANO: ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL MECANISMO DE PROPULSIÓN	1075
<i>José Emilio Traver, Blas M. Vinagre and Ines Tejado</i>	
Planificación multinúcleo en sistemas particionados	1083
<i>Vicent Brocal, Alfons Crespo and Patricia Balbastre</i>	
Arquitectura de control multimodal para robótica asistencial	1089
<i>José María Catalán Orts, Jorge Díez, Arturo Bertomeu-Motos, Francisco J. Badesa, Rafael Puerto Manchon, José María Sabater and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
MEJORAS EN LA ARQUITECTURA DE CONTROL E INTERFAZ DE USUARIO PARA EL CONTROL DE UN HROV	1095
<i>Juan Carlos García Sánchez, Javier Pérez, J. Javier Fernández, Paulo Menezes and Pedro J Sanz</i>	

MANIPULACIÓN REMOTA EN INSTALACIONES CON ELEVADO GRADO DE RADIACIÓN	1101
<i>Sofía Coloma, Jose Breñosa, Luis Rubio, Manuel Ferre and Rafael Aracil</i>	
DETECCIÓN DE VEHÍCULOS BASADA EN VISIÓN POR COMPUTADOR PARA SISTEMA DE AYUDA A LA CONDUCCIÓN EN TRÁFICO URBANO. GENERACIÓN DE HIPÓTESIS.	1108
<i>Manuel Ibarra, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla and Juan Pérez</i>	
ESTRATEGIA AUTO-ADAPTATIVA BASADA EN TÉCNICAS DE INGENIERÍA DE CONTROL PARA SISTEMAS EMPOTRADOS DISTRIBUIDOS.....	1116
<i>Raúl Mario Del Toro Matamoros, Andrei Pruteanu and Rodolfo Haber Guerra</i>	
Accuracy analysis of marker-based 3D visual localization	1124
<i>Alberto López-Cerón and Jose María Cañas</i>	
Protección Multi-robot de Infraestructuras: Un Enfoque Cooperativo para Entornos con Información Limitada	1132
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
Plataforma didáctica de bajo coste para el control de actitud y orientación en UAVs multirotor.....	1140
<i>Javier Rico-Azagra, Montserrat Gil-Martinez, Ramon Rico and Paloma Maisterra</i>	
DOCTUS, UNA HERRAMIENTA DE E-LEARNING INNOVADORA PARA EDUCACIÓN EN AUTOMÁTICA Y ÁREAS AFINES	1148
<i>Fabio Gómez-Estern, David Muñoz de La Peña Sequeda and Carlos Sánchez Cazorla</i>	
Predicción del índice de fermentación de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) mediante análisis de imagen y redes neuronales.....	1156
<i>Mohamed Abderrahim, Luis Condezo-Hoyos, Noemi Leon Roque and Silvia M. Arribas</i>	
Soluciones alternativas al control predictivo basado en modelo de Volterra	1161
<i>Jorn Gruber and Ignacio Peñarrocha</i>	
PRIMERA APROXIMACIÓN DE DISEÑO DE UN ROVER MINIMALISTA BIO-INSPIRADO.....	1167
<i>Mauricio Henriquez and Matilde Santos</i>	
ESTUDIO DE UN GUANTE DE DATOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA CIRUGIA LAPAROSCÓPICA ASISTIDA POR LA MANO...	1175
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan C. Fraile and Javier P. Turiel</i>	
ESTUDIO DINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DE UN ROBOT ÁPODO MODULAR E HIPER-REDUNDANTE.....	1182
<i>José Luis González, Javier P. Turiel, Juan C. Fraile, María A. P. Rueda and Ricardo Martín</i>	
Objects positioning in water surface from a single image.....	1190
<i>Juan Romeo, Joaquin Aranda, Gonzalo Pajares and Jesus Manuel de La Cruz</i>	

SIAR: an autonomous ground robot for sewer inspection	1198
<i>David Alejo, Carlos Marques, Fernando Caballero Benítez, Paulo Alvito and Luis Merino</i>	
ESTUDIO DE CONSUMOS DE GAS EN ENTORNOS RESIDENCIALES BASADO EN REDES NEURONALES	1205
<i>Alain Porto, Eloy Irigoyen and Xabier Basogain</i>	
A ROS REACTIVE NAVIGATION SYSTEM FOR GROUND VEHICLES BASED ON TP-SPACE TRANSFORMATIONS	1213
<i>Enrique Rodriguez, Jose Luis Blanco, Jose Luis Torres, Jose Carlos Moreno, Antonio Gimenez and Jose Luis Guzman</i>	
Detección de Lugares con Cámaras RGB-D. Aplicación a Cierre de Bucles en SLAM.....	1221
<i>David Zúñiga-Noël, José Raúl Ruiz Sarmiento and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Tonatiuh, un trazador de rayos basado en simulación de Monte Carlo y con licencia GPL de GNU	1229
<i>Luis G. Palacín</i>	
INDOOR POSITIONING PREDICTION SYSTEM BASED ON WIRELESS NETWORKS AND DEPTH SENSING CAMERAS	1237
<i>Jaime Duque Domingo, Carlos Cerrada and Enrique Valero</i>	
Nash Solution as a Multi-criteria Decision Making technique for control problems.....	1243
<i>Helem Sabina Sanchez, Ramon Vilanova, Antonio Visioli and Orlando Arrieta</i>	
Simplified Fuzzy Model based Predictive Control for a nonlinear system	1250
<i>Juan Manuel Escaño, Carlos Bordons, Samira Roshany-Yamchi, Kritchai Witheephanich and Jean Michel Rubillon</i>	

MODELADO DINÁMICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT TREPADOR TIPO SERIE CON 4 GRADOS DE LIBERTAD

Adrián Peidró, Alba Hortal, Arturo Gil, José María Marín, David Úbeda, Óscar Reinoso
 Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
 Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), España
 {adrian.peidro, alba.hortal, arturo.gil, jmarin, ubeda, o.reinoso}@goumh.umh.es

Resumen

Este artículo presenta el modelado dinámico completo de un robot trepador con arquitectura serie y 4 grados de libertad. En primer lugar se obtiene el modelo cinemático del robot, modelándolo como un sistema articulado libre en el espacio. A continuación, se obtiene su modelo dinámico inverso empleando las ecuaciones de Lagrange. El modelo obtenido permite resolver la dinámica inversa del robot trepador estudiado independientemente de cuál de sus garras se fije al entorno o de cuál sea su postura en dicho entorno. El modelo obtenido ha sido implementado en una interfaz gráfica de usuario que permite simular la cinemática y la dinámica inversa del robot estudiado.

Palabras Clave: Cinemática, Dinámica inversa, Lagrange, Robot trepador, Simulador.

1 INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta el análisis dinámico inverso del robot trepador mostrado en la Figura 1. Este robot pertenece a una clase de robots trepadores de estructuras formados por dos garras unidas por una cadena cinemática con arquitectura serie, paralela o híbrida. Estos robots se denominan de tipo “paso-a-paso” [9] debido a su modo de locomoción: para moverse por una estructura, fijan una garra a la misma y utilizan la cadena cinemática para posicionar la otra garra en el siguiente punto de sujeción. A continuación, fijan esta última garra y liberan la primera, repitiendo el proceso. Estos robots disfrutan de una elevada movilidad para explorar estructuras, pero tienen como inconvenientes un peso elevado y una alta complejidad.

Durante las últimas dos décadas, numerosos autores han diseñado multitud de robots trepadores paso-a-paso, con arquitecturas muy variadas. Por ejemplo, se han propuesto robots de arquitectura serie con 6 [2], 4 [9], 5 [4] y 8 [7] grados de libertad. También se ha

diseñado un robot trepador basado en la plataforma paralela de Gough-Stewart [1]. Finalmente, otros autores han propuesto arquitecturas híbridas con 4 [10], 12 [3] y 10 [6] grados de libertad.

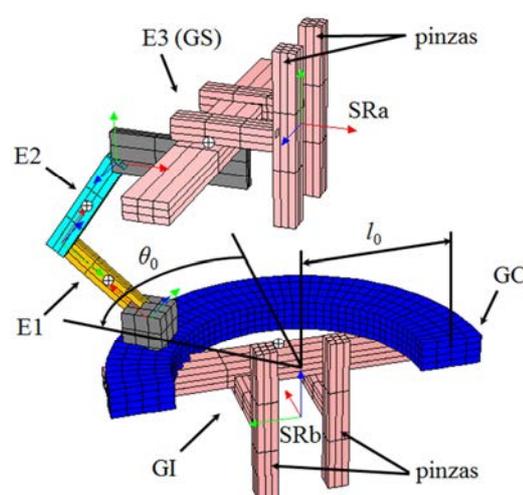


Figura 1: Robot trepador propuesto en [9]

Un aspecto clave en el diseño de robots trepadores de tipo paso-a-paso es el sistema de adhesión mediante el que el robot se sujeta a la estructura. Dicha adhesión puede ser de tipo mecánico (garras), magnético, por vacío, químico, etc., y su diseño requiere el análisis dinámico del robot.

En este artículo se obtiene el modelo dinámico del robot trepador 3DCLIMBER propuesto por Tavakoli et al. [9], mostrado en la Figura 1. El objetivo del análisis presentado aquí es estudiar los requerimientos de los actuadores de dicho robot, así como analizar las fuerzas y pares de sujeción en las garras del robot, para poder comparar en el futuro dichos parámetros con los correspondientes a los de otros robots trepadores. Aunque la dinámica del robot 3DCLIMBER ya fue estudiada en [8], el modelo allí presentado únicamente consideraba la dinámica plana de la cadena serie 3R del robot, asumiendo además que el robot trepa por un poste vertical paralelo a la aceleración de la gravedad.

En cambio, en este artículo presentamos un análisis dinámico más general y completo del mencionado robot, en el que se modela el robot como un mecanismo articulado libre en el espacio, considerando todos sus grados de libertad y sin fijar a priori ninguna de sus garras a la estructura. De esta forma, el modelo presentado en este artículo permite resolver la dinámica inversa del mencionado robot independientemente de cuál de sus garras se fije a la estructura, sea cual sea la postura del robot o la posición de la estructura en la que se encuentre sujeto el mismo. El modelo obtenido en este artículo, además, ha sido implementado en una intuitiva interfaz gráfica de usuario que permite simular la cinemática y la dinámica del robot.

Este artículo está organizado como sigue. En la sección 2 se analiza la cinemática del robot trepador de la Figura 1. En la sección 3 se modela la dinámica de dicho robot mediante las ecuaciones de Lagrange. La sección 4 presenta una herramienta desarrollada que permite simular la dinámica del robot estudiado. Finalmente, la sección 5 concluye este artículo.

2 CINEMÁTICA DEL ROBOT

En esta sección se describe la arquitectura del robot trepador paso-a-paso propuesto por Tavakoli et al. [9], y se obtiene su modelo cinemático, que será necesario para construir posteriormente el modelo dinámico de dicho robot.

El robot trepador propuesto en [9] consta de dos garras unidas por una cadena cinemática de tipo serie con 4 grados de libertad, como se muestra en la Figura 1. La garra inferior (GI) tiene una guía circular (GC) sobre la que desliza una cadena serie plana de tipo 3R, siendo θ_0 el ángulo que forman el plano de simetría de la garra inferior y el plano de movimiento de la cadena 3R plana. La cadena plana 3R consta de tres eslabones E1, E2 y E3, conectados en serie a través de articulaciones de revolución con ángulos relativos θ_1 , θ_2 y θ_3 , según muestra la Figura 2. El eslabón E3 coincide con la garra superior (GS).

Para analizar la cinemática y la dinámica de este robot se han definido varios sistemas de referencia solidarios a distintos cuerpos del mismo. Como es habitual, en este artículo los ejes X , Y y Z de los sistemas de referencia se representan mediante los colores rojo, verde y azul, respectivamente. El sistema de referencia SRb es solidario a la garra inferior. El origen de dicho sistema de referencia se encuentra en el punto medio entre las pinzas de la garra inferior, con los ejes orientados según se muestra en la Figura 1 (los ejes X y Z del sistema SRb definen el plano de simetría de la garra inferior, produciéndose la rotación θ_0 alrededor del eje Z).

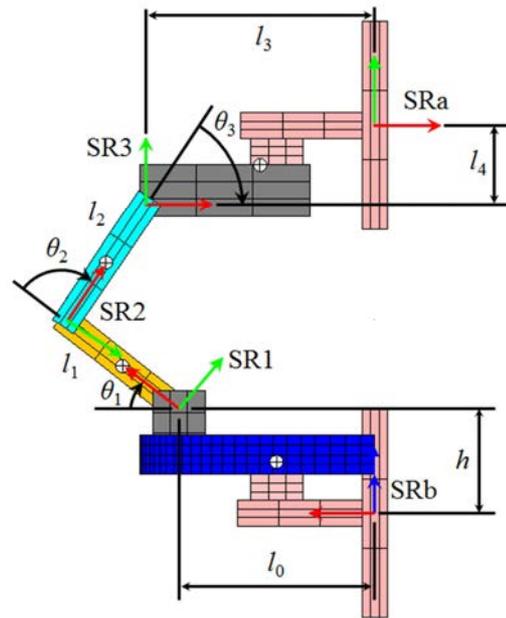


Figura 2: Cadena serie 3R plana del robot trepador

Por otra parte, otro sistema de referencia SR1 es solidario al eslabón E1 de la cadena plana 3R. Como muestra la Figura 2, el origen del sistema SR1 se encuentra sobre el eje de la rotación θ_1 , con su eje X a lo largo del eslabón, su eje Z coincidente con el eje de rotación de la articulación θ_1 , y su eje Y escogido para formar un sistema dextrógiro. Según las Figuras 1 y 2, la transformación ${}^{SRb}T_{SR1}$ entre los dos sistemas de referencia SRb y SR1 puede obtenerse multiplicando las siguientes cinco matrices de transformación homogénea:

$${}^{SRb}T_{SR1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_0 & -s_0 & 0 & 0 \\ s_0 & c_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) & -\sin(\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & \sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$, h es la distancia vertical entre los orígenes de los sistemas de referencia SRb y SR1 y l_0 es el radio medio de la guía circular. Según la Figura 2, la relación entre los sistemas de referencia SR1 y SR3 puede obtenerse como sigue:

$$\begin{aligned}
 {}^{SR1}\mathbf{T}_{SR3} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi) & -\sin(\pi) & 0 \\ 0 & \sin(\pi) & \cos(\pi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

donde l_1 y l_2 son las longitudes de los eslabones E1 y E2, respectivamente. Finalmente, la relación entre el sistema SR3 y el sistema SRa viene dada por la siguiente transformación:

$${}^{SR3}\mathbf{T}_{SRa} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde l_3 y l_4 son dimensiones de la garra superior del robot (ver Figura 2). Al igual que el sistema SR3, el sistema SRa es solidario a la garra superior, su origen está situado en el punto medio entre las pinzas de dicha garra, y su orientación con respecto a dicha garra es la mostrada en la Figura 1. Multiplicando todas las matrices anteriores se obtiene la transformación homogénea completa del robot, que proporciona la posición y orientación de la garra superior (sistema de referencia SRa) con respecto a la garra inferior (sistema de referencia SRb):

$${}^{SRb}\mathbf{T}_{SRa} = {}^{SRb}\mathbf{T}_{SR1} {}^{SR1}\mathbf{T}_{SR3} {}^{SR3}\mathbf{T}_{SRa} \quad (4)$$

Para realizar el modelado dinámico en la siguiente sección, será conveniente definir explícitamente variables que definan las posiciones y orientaciones absolutas de ambas garras, tanto de la inferior como de la superior. Con "posición y orientación absolutas" nos referimos a la posición y orientación de las garras con respecto a un sistema de referencia "mundo" (que denotaremos por W), fijado en algún punto de la estructura a explorar por el robot. La posición absoluta de la garra inferior se codificará mediante la posición (x_b, y_b, z_b) del origen del sistema de referencia SRb solidario a la misma, mientras que su orientación absoluta se codificará mediante los 3 ángulos ZYZ de Euler $(\alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b})$, que expresan la orientación del sistema SRb con respecto al sistema del mundo W. De forma similar, la posición absoluta de la garra superior se codificará mediante la posición (x_a, y_a, z_a) del sistema SRa, mientras que su orientación absoluta se codificará mediante los 3 ángulos ZYZ de Euler $(\alpha_{1a}, \alpha_{2a}, \alpha_{3a})$. A partir de las variables anteriores, la posición y orientación absolutas de cualquiera de las garras se pueden

codificar en una sola matriz de transformación homogénea con la siguiente forma:

$${}^W\mathbf{T}_{SRj} = \begin{bmatrix} & & x_j \\ & {}^W\mathbf{R}_{SRj} & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & z_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde $j = a$ para la garra superior, mientras que $j = b$ para la garra inferior. ${}^W\mathbf{R}_{SRj}$ es la matriz 3x3 de rotación del sistema SRj con respecto al mundo, correspondiente a la elección ZYZ de ángulos de Euler:

$${}^W\mathbf{R}_{SRj} = \begin{bmatrix} c_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{3j}} - s_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{2j}}s_{\alpha_{3j}} & \dots & \dots \\ s_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{3j}} + c_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{2j}}s_{\alpha_{3j}} & \dots & \dots \\ s_{\alpha_{2j}}s_{\alpha_{3j}} & \dots & \dots \\ \dots & -c_{\alpha_{1j}}s_{\alpha_{3j}} - s_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{2j}}c_{\alpha_{3j}} & s_{\alpha_{1j}}s_{\alpha_{2j}} \\ \dots & -s_{\alpha_{1j}}s_{\alpha_{3j}} + c_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{2j}}c_{\alpha_{3j}} & -c_{\alpha_{1j}}c_{\alpha_{2j}} \\ \dots & s_{\alpha_{2j}}c_{\alpha_{3j}} & c_{\alpha_{2j}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Es evidente que las posiciones y orientaciones absolutas de ambas garras no son independientes, sino que están relacionadas a través de la cadena cinemática de 4 grados de libertad que las une. Por tanto, las matrices ${}^W\mathbf{T}_{SRa}$ y ${}^W\mathbf{T}_{SRb}$ están relacionadas a través de la siguiente restricción:

$${}^W\mathbf{T}_{SRa} = {}^W\mathbf{T}_{SRb} {}^{SRb}\mathbf{T}_{SRa} \quad (7)$$

Donde la matriz ${}^{SRb}\mathbf{T}_{SRa}$, definida en la ecuación (4), depende de las 4 articulaciones de la cadena cinemática completa (ángulos $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ y θ_3).

2.1 RELACIONES DE VELOCIDAD

La ecuación matricial (7) introduce restricciones entre las variables del problema, de manera que la posición (x_a, y_a, z_a) y la orientación $(\alpha_{1a}, \alpha_{2a}, \alpha_{3a})$ de la garra superior del robot quedan ambas determinadas por la posición (x_b, y_b, z_b) y la orientación $(\alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b})$ de la garra inferior, así como por los 4 ángulos de la cadena cinemática que conecta ambas garras ($\theta_0, \theta_1, \theta_2$ y θ_3). Esta relación también se da a nivel de velocidades: las derivadas de las anteriores 16 variables están relacionadas a través de determinadas ecuaciones a obtener seguidamente.

En primer lugar, se obtendrá la relación entre la velocidad lineal $(\dot{x}_a, \dot{y}_a, \dot{z}_a)$ de la garra superior y el resto de velocidades. Igualando los elementos (1,4), (2,4) y (3,4) de las matrices del lado izquierdo y derecho de la ecuación (7) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}_a = f_{x_a}(x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (8)$$

$$\dot{y}_a = f_{y_a}(x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (9)$$

$$z_a = f_{z_a}(x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (10)$$

donde f_{x_a} , f_{y_a} y f_{z_a} denotan funciones de las variables $\{x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ (la expresión de dichas funciones no se incluye aquí debido a su elevado tamaño). Agrupando todos los términos al mismo lado de cada ecuación, las anteriores ecuaciones pueden escribirse como sigue:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

donde $\Gamma_1 = f_{x_a} - x_a$, $\Gamma_2 = f_{y_a} - y_a$ y $\Gamma_3 = f_{z_a} - z_a$. Derivando con respecto al tiempo la ecuación (11) se obtiene la siguiente ecuación de velocidades:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_1}{\partial y_b} & \dots & \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \alpha_{3a}} \\ \frac{\partial \Gamma_2}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial y_b} & \dots & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial \alpha_{3a}} \\ \frac{\partial \Gamma_3}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial y_b} & \dots & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial \alpha_{3a}} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

donde $\mathbf{q} = [x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, x_a, y_a, z_a, \alpha_{1a}, \alpha_{2a}, \alpha_{3a}]^T$ (los puntos suspensivos en la ecuación (12) indican que deben escribirse todas las columnas de las parciales con respecto a todas las variables del vector \mathbf{q} , en el orden en que aparecen en \mathbf{q}). Conocidas las velocidades lineal y angular de la garra inferior, y las velocidades articulares $(\dot{\theta}_0, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3)$, podría obtenerse la velocidad lineal $(\dot{x}_a, \dot{y}_a, \dot{z}_a)$ de la garra superior a partir de la anterior ecuación.

Para obtener la relación entre las velocidades $(\dot{\alpha}_{1a}, \dot{\alpha}_{2a}, \dot{\alpha}_{3a})$ y las velocidades del resto de variables angulares, calcularemos la velocidad angular Ω_a de la garra superior por dos caminos distintos. Dado un sistema de referencia, con su orientación representada por una matriz de rotación \mathbf{R} , el vector de velocidad angular Ω de dicho sistema de referencia puede obtenerse como [5]:

$$\langle \Omega \rangle = \dot{\mathbf{R}}\mathbf{R}^T, \text{ donde: } \dot{\mathbf{R}} = \sum_{\psi=1}^n (\partial \mathbf{R} / \partial \alpha_\psi) \dot{\alpha}_\psi \quad (13)$$

y donde $\langle \Omega \rangle$ denota la matriz antisimétrica asociada al vector Ω . Según (13), si la matriz de rotación \mathbf{R} depende de varias coordenadas angulares $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$, entonces el vector Ω debe poder escribirse como combinación lineal de las velocidades $\dot{\alpha}_\psi$ de dichas coordenadas angulares (que son distintas, en general, a las componentes del vector de velocidad angular). Teniendo esto en cuenta y aplicando la ecuación (13) con la submatriz de rotación de la matriz ${}^W\mathbf{T}_{SRa}$ del lado izquierdo de

la ecuación (7), se obtiene el vector de velocidad angular Ω_a de la garra superior:

$$\Omega_a = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha_{1a} & \sin \alpha_{1a} \sin \alpha_{2a} \\ 0 & \sin \alpha_{1a} & -\cos \alpha_{1a} \sin \alpha_{2a} \\ 1 & 0 & \cos \alpha_{2a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_{1a} \\ \dot{\alpha}_{2a} \\ \dot{\alpha}_{3a} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Por otro lado, el vector Ω_a también puede obtenerse aplicando la ecuación (13) con la submatriz de rotación de la matriz $[{}^W\mathbf{T}_{SRb} {}^{SRb}\mathbf{T}_{SRa}]$, del lado derecho de la ecuación (7), lo cual proporciona una expresión de la siguiente forma, análoga a (14):

$$\Omega_a = \mathbf{H}[\dot{\alpha}_{1b}, \dot{\alpha}_{2b}, \dot{\alpha}_{3b}, \dot{\theta}_0, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T \quad (15)$$

donde \mathbf{H} es una matriz de tamaño 3×7 , cuya expresión no se muestra debido a su elevado tamaño. Igualando el lado derecho de las ecuaciones (14) y (15), y agrupando todos los términos en el mismo lado de la ecuación resultante, se obtiene la siguiente ecuación, en la que los términos de la matriz de coeficientes (que son conocidos) se han denotado por las derivadas parciales con respecto a tres funciones Γ_4 , Γ_5 y Γ_6 , cuyas expresiones explícitas son desconocidas:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Gamma_4}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial y_b} & \dots & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial \alpha_{3a}} \\ \frac{\partial \Gamma_5}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial y_b} & \dots & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial \alpha_{3a}} \\ \frac{\partial \Gamma_6}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial y_b} & \dots & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial \alpha_{3a}} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Conociendo las velocidades de las variables articulares $(\dot{\theta}_0, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3)$ y la velocidad de los ángulos de Euler de la garra inferior $(\dot{\alpha}_{1b}, \dot{\alpha}_{2b}, \dot{\alpha}_{3b})$, podrían despejarse de la anterior ecuación las velocidades de los ángulos de Euler de la garra superior $(\dot{\alpha}_{1a}, \dot{\alpha}_{2a}, \dot{\alpha}_{3a})$.

Cabe destacar que las anteriores ecuaciones de velocidad (12) y (16) pueden derivarse con respecto al tiempo para obtener las relaciones de aceleración, que permitirían determinar las aceleraciones de la garra superior $(\ddot{x}_a, \ddot{y}_a, \ddot{z}_a, \ddot{\alpha}_{1a}, \ddot{\alpha}_{2a}, \ddot{\alpha}_{3a})$ a partir de las aceleraciones de la garra inferior $(\ddot{x}_b, \ddot{y}_b, \ddot{z}_b, \ddot{\alpha}_{1b}, \ddot{\alpha}_{2b}, \ddot{\alpha}_{3b})$, de las aceleraciones articulares $(\ddot{\theta}_0, \ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2, \ddot{\theta}_3)$, y de las velocidades de todas las 16 variables.

3 MODELADO DINÁMICO

En esta sección se obtiene el modelo dinámico del robot trepador estudiado en este artículo. El objetivo de obtener dicho modelo dinámico es, principalmente, resolver el problema dinámico inverso del robot: dado un estado de movimiento del robot (caracterizado por la posición y orientación de

todos los cuerpos del robot, así como por sus velocidades y aceleraciones), deseamos obtener las fuerzas y los pares necesarios para lograr tal estado de movimiento.

El resultado del análisis de la dinámica inversa no debe ser únicamente el valor de los pares a aplicar en las cuatro articulaciones del robot por sus cuatro actuadores (pares en las articulaciones correspondientes a los giros $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ y θ_3), sino que también estamos especialmente interesados en conocer las fuerzas y pares de sujeción que debe proporcionar la garra fija del robot (sea la garra superior o la inferior) para mantenerlo sujeto a la estructura por la que trepa. Para realizar el modelado dinámico del robot trepador, en principio se considerará que éste se encuentra moviéndose libremente en el espacio, sin ninguna de sus dos garras sujetando la estructura. La sujeción de alguna de las garras a la estructura será una condición a imponer posteriormente.

La dinámica del robot estudiado se modelará mediante las ecuaciones de Lagrange para sistemas con restricciones, considerando que la ecuación (7) impone restricciones entre las variables cinemáticas. En un sistema mecánico con restricciones entre sus coordenadas generalizadas, cada una de las coordenadas generalizadas q_u del sistema ($u = 1, \dots, D$) añade a la dinámica una ecuación como la siguiente [11]:

$$F_{q_u} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_u} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_u} - \sum_{r=1}^C \lambda_r \frac{\partial \Gamma_r}{\partial q_u} \quad (17)$$

donde $L = K - V$ es el Lagrangiano del sistema mecánico, siendo K la energía cinética total de dicho sistema y V su energía potencial total. F_{q_u} es la fuerza generalizada asociada a la coordenada generalizada q_u , de forma que F_{q_u} será una fuerza si q_u tiene unidades de longitud, o bien F_{q_u} será un momento si q_u tiene unidades angulares. λ_r ($r = 1, \dots, C$) son los multiplicadores de Lagrange (siendo C el número de restricciones) y Γ_r es la r -ésima función de restricción.

Las coordenadas generalizadas a considerar en el modelo dinámico son las siguientes: $q_u \in Q = \{x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, x_a, y_a, z_a, \alpha_{1a}, \alpha_{2a}, \alpha_{3a}\}$. Por tanto, existirá una ecuación como (17) por cada una de estas 16 coordenadas.

En cuanto a los términos de derivadas parciales $\partial \Gamma_r / \partial q_u$ en la ecuación (17), que introducen fuerzas de restricción, en el modelo a plantear existen $C = 6$ restricciones entre las coordenadas generalizadas (3 de posición y 3 de orientación), y las derivadas parciales a emplear en la ecuación de Lagrange son

las definidas en las ecuaciones de velocidad (12) y (16).

En las siguientes subsecciones se describe la obtención del resto de términos de la ecuación (17) para las distintas coordenadas generalizadas, así como la resolución de la ecuación matricial resultante para obtener la solución de la dinámica inversa para un determinado estado de movimiento del robot.

3.1 CONSTRUCCIÓN DEL LAGRANGIANO

Para obtener el Lagrangiano L se precisa obtener la energía cinética y potencial de todos los cuerpos del robot: las 2 garras y los eslabones E1 y E2.

La energía potencial V_k de cada cuerpo k se puede obtener como $V_k = -m_k \mathbf{g}^T \mathbf{r}_{cm,k}^W$, donde $\mathbf{r}_{cm,k}^W$ es la posición absoluta (con respecto al mundo W) del centro de masa del cuerpo k , m_k es su masa y $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z]^T$ es el vector de gravedad en ejes del sistema de referencia del mundo W . Se asume que, en cada uno de los 4 cuerpos del robot, la masa está distribuida de forma uniforme, resultando en las correspondientes posiciones de los centros de masa.

En cuanto a la energía cinética K_k de cada cuerpo k , ésta comprende la energía de traslación del centro de masa y la energía de rotación alrededor del centro de masa. La velocidad lineal de cada centro de masa, necesaria para calcular la energía de traslación, se obtiene como la derivada temporal del vector $\mathbf{r}_{cm,k}^W$ de cada cuerpo. Para calcular la energía de rotación de cada cuerpo es preciso obtener su velocidad angular, que puede obtenerse de la ecuación (13), utilizando la matriz de rotación absoluta (con respecto al mundo W) ligada a dicho cuerpo.

Debido al gran tamaño de los términos involucrados (vectores de posición, velocidades, matrices de rotación, etc.), la expresión final del Lagrangiano L es demasiado extensa y no se incluirá aquí.

3.2 DERIVADAS DEL LAGRANGIANO

Una vez se dispone del Lagrangiano L , es necesario calcular sus derivadas en la ecuación (17). En primer lugar, la regla de la cadena permite expresar la derivada temporal de la ecuación (17) como una suma de derivadas parciales de segundo orden multiplicadas por las velocidades y aceleraciones de todas las coordenadas generalizadas, ya que en general la derivada parcial $\partial L / \partial \dot{q}_u$ es función de dichas coordenadas y de sus velocidades:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_u} \right) = \sum_{q_w \in Q} \left(\frac{\partial^2 L}{\partial q_w \partial \dot{q}_u} \dot{q}_w + \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_w \partial \dot{q}_u} \ddot{q}_w \right) \quad (18)$$

De esta forma, todas las derivadas de L a calcular en la ecuación (17) son ahora derivadas parciales de primer y segundo orden. Sin embargo, dado que la expresión de L es bastante complicada y extensa, el cálculo simbólico de todas las derivadas parciales necesarias es inviable. Por tanto, como alternativa al cálculo simbólico de las derivadas parciales, realizaremos el cálculo numérico de dichas derivadas parciales aproximándolas por diferencias centrales, mejorando la precisión del resultado mediante el método de extrapolación de Richardson.

3.3 RESOLUCIÓN DE LA DINÁMICA INVERSA

Una vez se ha determinado cómo obtener los distintos términos de la ecuación de Lagrange (17), se particulariza dicha ecuación para cada una de las 16 coordenadas generalizadas $q_u \in Q = \{x_b, y_b, z_b, \alpha_{1b}, \alpha_{2b}, \alpha_{3b}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, x_a, y_a, z_a, \alpha_{1a}, \alpha_{2a}, \alpha_{3a}\}$, obteniendo un sistema de 16 ecuaciones que puede escribirse matricialmente como sigue:

$$\begin{bmatrix} F_{x_b} \\ F_{y_b} \\ \vdots \\ F_{\alpha_{2a}} \\ F_{\alpha_{3a}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_b} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_b} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_b} \right) - \frac{\partial L}{\partial y_b} \\ \vdots \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_{2a}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_{2a}} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_{3a}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_{3a}} \end{bmatrix} - \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial x_b} & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial x_b} \\ \frac{\partial \Gamma_1}{\partial y_b} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial y_b} & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial y_b} & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial y_b} & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial y_b} & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial y_b} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial \alpha_{2a}} & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial \alpha_{2a}} \\ \frac{\partial \Gamma_1}{\partial \alpha_{3a}} & \frac{\partial \Gamma_2}{\partial \alpha_{3a}} & \frac{\partial \Gamma_3}{\partial \alpha_{3a}} & \frac{\partial \Gamma_4}{\partial \alpha_{3a}} & \frac{\partial \Gamma_5}{\partial \alpha_{3a}} & \frac{\partial \Gamma_6}{\partial \alpha_{3a}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \end{bmatrix}$$

La resolución de la dinámica inversa proporciona las fuerzas generalizadas que son necesarias en cada uno de los grados de libertad del robot para lograr un determinado estado de movimiento del mismo, determinado por las 16 coordenadas generalizadas, las velocidades de éstas y sus aceleraciones. Conocido el estado de movimiento del robot, se conoce la matriz de derivadas del Lagrangiano (el primer vector columna del lado derecho de la ecuación (19)), así como la matriz de derivadas parciales $\partial \Gamma_r / \partial q_u$ del lado derecho de la ecuación (19). Por tanto, para la dinámica inversa, las únicas incógnitas de la ecuación (19) son las 16 fuerzas generalizadas del lado izquierdo de la ecuación, así como los 6 multiplicadores de Lagrange del lado

derecho. Además, todas estas incógnitas aparecen linealmente en el sistema a resolver. El problema es que la ecuación matricial (19) únicamente provee 16 ecuaciones escalares para determinar 16+6 incógnitas, por lo que sobran incógnitas. Este problema desaparece cuando fijamos una de las garras del robot a la estructura y dejamos la otra garra libre, como se describe a continuación.

Cuando se fija la garra inferior a la estructura, las fuerzas externas sobre la garra superior son nulas ya que ésta se encuentra libre (no se cuenta la gravedad, pues ya ha sido contabilizada a través del Lagrangiano). Por tanto: $F_{x_a} = F_{y_a} = F_{z_a} = F_{\alpha_{1a}} = F_{\alpha_{2a}} = F_{\alpha_{3a}} = 0$. En tal caso, el sistema (19) únicamente tiene 16 incógnitas, que pueden resolverse como sigue: en primer lugar, de las 6 ecuaciones correspondientes a las coordenadas de la garra superior (que son las últimas 6 ecuaciones de (19), en las que el lado izquierdo es ahora nulo), se resuelven los 6 multiplicadores de Lagrange ($\lambda_1, \dots, \lambda_6$). A continuación, se sustituyen dichos multiplicadores de Lagrange en las restantes 10 ecuaciones (que son las 10 primeras ecuaciones de (19)). Esto permite obtener el resto de fuerzas generalizadas: los pares de las 4 articulaciones del robot ($F_{\theta_0}, F_{\theta_1}, F_{\theta_2}, F_{\theta_3}$), las fuerzas de sujeción ($F_{x_b}, F_{y_b}, F_{z_b}$) en la garra inferior, que está sujeta a la estructura, y los momentos de sujeción en dicha garra ($F_{\alpha_{1b}}, F_{\alpha_{2b}}, F_{\alpha_{3b}}$).

Similarmente, si se fija la garra superior y se deja libre la inferior, entonces: $F_{x_b} = F_{y_b} = F_{z_b} = F_{\alpha_{1b}} = F_{\alpha_{2b}} = F_{\alpha_{3b}} = 0$. En tal caso, de las primeras 6 ecuaciones de (19) se obtendrían los 6 multiplicadores de Lagrange, cuyo valor se sustituiría en las últimas 10 ecuaciones de (19) para obtener los pares de las 4 articulaciones del robot, las fuerzas de sujeción ($F_{x_a}, F_{y_a}, F_{z_a}$) en la garra superior, y los momentos de sujeción en dicha garra ($F_{\alpha_{1a}}, F_{\alpha_{2a}}, F_{\alpha_{3a}}$).

De esta forma, mediante un único modelo dinámico se puede resolver el problema dinámico inverso del robot estudiado, independientemente de qué garra se encuentre sujeta a la estructura.

3.4 PARES ASOCIADOS A LOS ÁNGULOS DE EULER

La interpretación de las fuerzas generalizadas asociadas a las variables ($\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$) es sencilla: dichas fuerzas generalizadas son los momentos necesarios en las 4 articulaciones del robot (momentos que serían generados por los actuadores).

También es fácil interpretar las fuerzas generalizadas asociadas a las variables x_j, y_j y z_j ($j \in \{a, b\}$) de la garra fija: son las fuerzas que debe proveer la garra para mantener el robot adherido a la estructura, en la dirección de los ejes X, Y y Z , respectivamente.

La interpretación de las fuerzas generalizadas asociadas a los ángulos de Euler ($\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \alpha_{3j}$) de la garra fija no es tan intuitiva, ya que las rotaciones ZXZ de Euler se producen de forma sucesiva alrededor de ejes móviles. Por tanto, dichas fuerzas generalizadas no deben interpretarse como momentos de sujeción alrededor de los ejes Cartesianos del sistema de referencia del mundo (W). Sin embargo, es posible obtener el momento de sujeción \mathbf{M}_j alrededor de los ejes Cartesianos del mundo, que es fácil de interpretar, a partir de los pares de Euler. Para ello se puede emplear la siguiente relación, análoga a la relación (14) entre la velocidad angular y las velocidades de los ángulos de Euler:

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha_{1j} & \sin \alpha_{1j} \sin \alpha_{2j} \\ 0 & \sin \alpha_{1j} & -\cos \alpha_{1j} \sin \alpha_{2j} \\ 1 & 0 & \cos \alpha_{2j} \end{bmatrix}^{-T} \begin{bmatrix} F_{\alpha_{1j}} \\ F_{\alpha_{2j}} \\ F_{\alpha_{3j}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

4 SIMULACIÓN Y EJEMPLOS

Esta sección presenta una herramienta de simulación que se ha desarrollado para poder simular y analizar la dinámica de los movimientos del robot trepador estudiado en este artículo en una estructura tridimensional. La herramienta puede descargarse de <http://arvc.umh.es/parola/serial4climber.html> (podría ser necesario actualizar Java para ejecutarla). Entre otras funcionalidades, la herramienta implementa los modelos cinemático y dinámico inverso descritos en las secciones previas.

La herramienta desarrollada, mostrada en la Figura 3, consta de 4 ventanas. La ventana V1 muestra el robot trepando por una estructura 3D. La ventana V2 permite cambiar la posición de la garra fija y modificar la geometría del robot o de la estructura. La ventana V3 permite cambiar la garra que se sujeta a la estructura, y también permite simular la cinemática directa, modificando el valor de los ángulos $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ y θ_3 . La ventana V3 también permite visualizar el espacio de trabajo o simular la cinemática inversa, introduciendo la posición deseada para la garra libre (ambos problemas han sido estudiados en [8]). Finalmente, la ventana V4 permite introducir las velocidades y aceleraciones de las distintas coordenadas generalizadas y simular la dinámica inversa, obteniendo y mostrando los momentos necesarios en las articulaciones del robot, así como las fuerzas y pares de sujeción necesarios en la garra fija, para conseguir el estado de movimiento introducido por el usuario.

A continuación se mostrarán dos ejemplos de la dinámica inversa del robot estudiado, resueltos mediante la herramienta de simulación presentada.

4.1 EJEMPLOS

Para los ejemplos, se asume que ambas garras tienen una masa de 1 kg, mientras que los eslabones E1 y E2 tienen una masa de 0.5 kg. La gravedad actúa en el sentido negativo del eje Z: $\mathbf{g} = [0, 0, -9.81]^T \text{ m/s}^2$. La posición de SRb es $x_b=0, y_b=0, z_b=0$, mientras que su orientación es $\alpha_{1b}=\alpha_{3b}=0, \alpha_{2b}=\pi/4$ rad. Los ángulos de las 4 articulaciones son (en radianes): $\theta_0=0, \theta_1=0.672, \theta_2=1.487$ y $\theta_3=0.982$. El robot se encuentra trepando por una barra a 45° , como se muestra en la Figura 4.

Para el primer ejemplo, el robot se encuentra parado en la configuración anterior (todas las velocidades y aceleraciones son nulas), con la garra inferior agarrando la estructura y la superior libre. La resolución de la dinámica inversa proporciona las siguientes fuerzas y momentos: $F_{x_b}=F_{y_b}=0, F_{z_b}=29.43$ N, $\mathbf{M}_b=[-6.5, -7.1, 0]^T \text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{\theta_0}=3.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{\theta_1}=-0.18 \text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{\theta_2}=-2.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ y $F_{\theta_3}=-1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$. \mathbf{M}_b es el momento de sujeción de la garra inferior, alrededor de los ejes Cartesianos del mundo W.

Para el segundo ejemplo, el robot se encuentra en la misma configuración, pero ahora la garra superior está fija y se tienen las siguientes velocidades articulares (en rad/s): $\dot{\theta}_0=1, \dot{\theta}_1=0, \dot{\theta}_2=-2, \dot{\theta}_3=-3$. La resolución de la dinámica inversa proporciona las siguientes fuerzas y momentos: $F_{x_a}=7.06$ N, $F_{y_a}=-6.5$ N, $F_{z_a}=35.9$ N, $\mathbf{M}_a=[6.1, -11, -3.9]^T \text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{\theta_0}=-1.04 \text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{\theta_1}=1.56 \text{ N}\cdot\text{m}$, $F_{\theta_2}=3.44 \text{ N}\cdot\text{m}$ y $F_{\theta_3}=-0.45 \text{ N}\cdot\text{m}$. \mathbf{M}_a es el momento de sujeción de la garra superior, alrededor de los ejes Cartesianos del mundo W.

En ambos ejemplos, los valores mostrados coinciden con los valores obtenidos en simulaciones realizadas en SimMechanics como comprobación.

5 CONCLUSIÓN

Este artículo ha presentado la obtención del modelo dinámico completo de un robot trepador de tipo paso-a-paso, con arquitectura serie y 4 grados de libertad. El modelo obtenido es totalmente general, siendo válido independientemente de cuál de las garras del robot se fije, e independientemente de la posición y orientación del robot en la estructura a explorar.

El modelo obtenido ha sido implementado en una intuitiva interfaz gráfica de usuario, que puede utilizarse para simular la cinemática y la dinámica inversa del robot en cualquier punto de una estructura. En el futuro se añadirán más funcionalidades a esta herramienta, así como más robots trepadores, lo que permitirá comparar distintas arquitecturas de robots trepadores en términos cinemáticos y de sus prestaciones dinámicas.



Figura 3: Herramienta desarrollada para simular el robot trepador

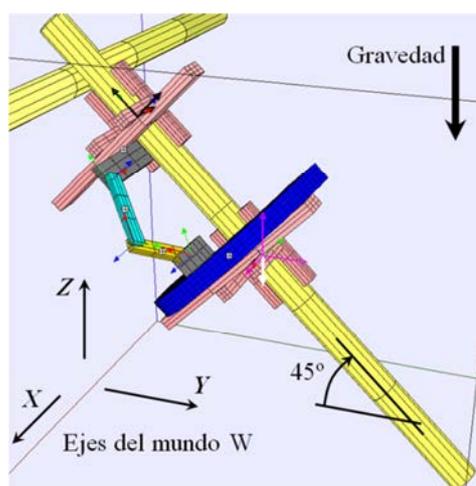


Figura 4: Configuración estudiada en los ejemplos

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación a través de la ayuda FPU13/00413, por el Ministerio de Economía a través del proyecto DPI2013-41557-P, y por la Generalitat Valenciana a través del proyecto AICO/2015/021.

Referencias

[1] Aracil R., Saltaren R.J., and Reinoso O. A climbing parallel robot: a robot to climb along tubular and metallic structures. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(1):16–22, 2006.

[2] Balaguer C., Giménez A., Pastor J.M., Padrón V.M., and Abderrahim M. A climbing autonomous robot for inspection applications in 3D complex environments. *Robotica*, 18(3):287–297, 2000.

[3] Figliolini G., Rea P., and Conte M. Mechanical Design of a Novel Biped Climbing and Walking Robot. In *Parenti-Castelli V. and Schiehlen W., editors, ROMANSY 18 Robot Design, Dynamics*

and Control, pp. 199–206. Springer Vienna, 2010.

[4] Guan Y., Jiang L., Zhu H., Zhou X., Cai C., Wu W., Li Z., Zhang H., and Zhang X. Climbot: A modular bio-inspired biped climbing robot. In *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1473–1478, September 2011.

[5] Holm D.D., Schmah T., and Stoica C. *Geometric Mechanics and Symmetry: From Finite to Infinite Dimensions*. Oxford University Press, 2009.

[6] Peidro A., Gil A., Marin J.M., and Reinoso O. Inverse Kinematic Analysis of a Redundant Hybrid Climbing Robot. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 12:163, 2015.

[7] Shvalb N., Moshe B.B., and Medina O. *A real-time motion planning algorithm for a hyper-redundant set of mechanisms*. *Robotica*, 31(8):1327–1335, 2013.

[8] Tavakoli M. *Design, implementation, path planning and control of a pole climbing robot*. PhD thesis, University of Coimbra, July 2010.

[9] Tavakoli M., Marques L., and De Almeida A.T. 3DCLIMBER: Climbing and manipulation over 3D structures. *Mechatronics*, 21(1):48–62, 2011.

[10] Tavakoli M., Zakerzadeh M.R., Vossoughi G.R., and Bagheri S. A hybrid pole climbing and manipulating robot with minimum DOFs for construction and service applications. *Industrial Robot: An International Journal*, 32(2):171–178, 2005.

[11] Tsai L.W. *Robot Analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.