



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



CEA

IFAAC

comité
español de
automática

XXXVI Jornadas de AUTOMÁTICA

- Libro de Actas -

2 - 4

Septiembre

2015

3il6ao 2015



Jornadas de Automática

Actas de las XXXVI Jornadas de Automática, 2 -4 de Septiembre 2015. Bilbao

Actas de las XXXVI Jornadas de Automática

2 – 4 de Septiembre de 2015, Bilbao

© Comité Español de Automática (CEA-IFAC)

PATROCINADORES



metro bilbao



BECKHOFF
New Automation Technology



Robotnik



Ingeteam

COLABORADORES



Robotnik



SIEMENS



OMRON



- Comités -

Comité científico (Directiva de CEA)

- Joseba Quevedo Casín (UPC) **Presidente**
- Carlos Balaguer Bernaldo de Quirós (UC3) **Vicepresidente**
- Miguel Angel Mañanas Villanueva (UPC) **Secretario**

Comité de Programa

- **Automar:** Pere Ridao Rodríguez (UdG)
- **Bioingeniería:** Javier Pérez Turiel (UVA)
- **Control Inteligente:** Matilde Santos Peñas (UCM) y Eloy Irigoyen Gordo (UPV/EHU)
- **Educación en Automática:** Fabio Gómez Estern (US)
- **Ingeniería de Control:** Ramón Vilanova i Arbos (UAB)
- **Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos:** Emilio Jiménez Macías (UR)
- **Robótica:** Pedro J Sanz Valero (UJI)
- **Sistemas de Tiempo Real:** José Enrique Simó Ten (UPV)
- **Visión por Computador:** Enrique Alegre Gutiérrez (UL)

Comité Local:

Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática/Sistemen Ingeniaritza eta Automatika Saila

Grupo de Control e Integración de Sistemas/Sistemen Integrazioa eta Kontrola Taldea (GCIS)

- Marga Marcos
- Maria Luz Alvarez
- Aintzane Armentia
- Fernando Artaza
- Arantza Burgos
- Itziar Cabanes
- Unai Gangoiti
- Vicente Gomez
- Eloy Irigoyen
- Nagore Iriondo
- Fabián López
- Dario Orive
- Federico Pérez
- Eva Portillo
- Isabel Sarachaga
- Asier Zubizarreta

- Presentación -

Este año 2015 se celebra la trigésimo-sexta edición de las Jornadas de Automática, auspiciada por el Comité Español de Automática de IFAC (CEA) y cuya organización ha recaído sobre el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la UPV/EHU.

El Comité de organización local ha trabajado con gusto para hacer de estas jornadas unas memorables y en las que todos sus asistentes se sientan a gusto, como en familia. Pero sois vosotros, los asistentes, los que realmente haréis que sean exitosas. Estamos orgullosos de anunciar que llegaremos a un número cercano a 200 asistentes.

En esta edición hemos querido acercar diferentes realidades a través de 5 plenarios muy diferentes. Desde la Fábrica del Futuro o industria 4.0, los retos en energías renovables o la robótica bio-médica, hasta lo que se espera en la formación de los nuevos doctores o el concepto de la ingeniería solidaria.

Por último, queremos agradecer a todos aquéllos que de un modo u otro han puesto su granito de arena para que estas Jornadas sean de alguna forma inolvidables: a las instituciones y organismos; a los Comités Científico y de Programa; al Comité Local y muy en especial, a los alumnos colaboradores, sin ellos seguro que hubieran salido mucho peor; a las empresas patrocinadoras y a las colaboradoras; y a todas aquellas personas que hayan intervenido de una forma u otra en la organización.

Deseamos que vuestra estancia en Bilbao sea lo más agradable posible y disfrutéis del "botxito", de su gente, de la gastronomía, de sus "tapitas" y "vinitos", además de fructífera en el ámbito científico.

Esperamos haberlo conseguido. Sólo vosotros podréis decirlo.

Marga Marcos

Presidenta del Comité Organizador

XXXVI Jornadas de Automática...

El número **36**,... pero ¿qué nos depara este número tan común a priori? Si buscamos el significado de este número nos topamos con una buena colección de definiciones, de las cuales, se pueden extraer múltiples y curiosas coincidencias,...

Se cita en una de las fuentes de la extendida numerología: "El 36: Es el número de la **enseñanza**, de los centros educacionales, de las asesorías, las consultoras, de la medicina. Junto con el 19 y el 23 es un número que conduce al **éxito**". Y qué entorno más educacional que el nuestro donde multitud de colegas de otras tantas universidades se dan cita para compartir sus trabajos, experiencias y vivencias del reciente pasado año "docente".

Siguen las citas: "Combina las cualidades del 3 con las del 6, logrando un equilibrio, armonía, mucha intuición, **aspiraciones positivas. Indica buenos augurios para todos los centros educacionales que contribuyan a guiar la creatividad y la autoexpresión**". Pues qué mejor entorno que el de las Jornadas de Automática para ofrecer a nuestros colegas con marcada ilusión los resultados de nuestros últimos logros, donde a buen seguro la creatividad ha tenido su huequecito.

De una nueva fuente: "El 36: Era de una importancia tan fundamental para los pitagóricos que bajo su auspicio prestaban juramento. Cabe recordar que, para ellos, el 6 era el único número adaptado al alma y lo llamaban «**la perfección de las partes**». Treinta y seis era el resultado del 6 multiplicado por sí mismo, es decir, potenciado. Por otra parte, los discípulos de Pitágoras sostenían que cada 216 años se producía una regeneración total del universo.". Qué curiosidad que los principales objetivos de nuestros trabajos vayan en pro de conseguir algún tipo de perfección: Control, exactitud, precisión, estabilidad,... términos que nos definen por antonomasia. Porque de algo sí podemos estar seguros. De un modo u otro hacemos de nuestras vidas una prolongación de nuestras actitudes como científicos. ¡Y eso tampoco tiene por qué ser un aspecto negativo! A buen seguro que nuestra forma de ser nos ha logrado sacar de más de un apuro, tanto en el plano profesional, como en el resto de planos (incluido el semiplano izquierdo del plano complejo).

Y si nos planteamos que el número 36 es dos veces el 18,... cita textual: "El 18: Es el número de los grandes líderes, de los **cambios**, las **convulsiones**, las grandes creencias y la **transgresión de ellas**. Por otra parte posee una naturaleza emocional e **intelectual**. Su raíz 9 representa **la fuerza, la energía**, la sanación, la universalidad, la compasión y la **objetividad**. **Se lograrán grandes realizaciones personales**. El 1 y el 8 combinan la

independencia, la eficiencia y el poder, se alterna el juicio con la intuición.”. Todo lo expuesto en esta cita son claros componentes de la esencia de un investigador. Sin aportación intelectual, no hay cambios. Y para lograr esa intelectualidad hace falta una buena base, conseguida en una formación continua a base de fuerza, energía, con pequeñas dosis de juicio e intuición, alternadas o combinadas. Solo la objetividad de nuestros trabajos y la independencia en su realización ha dado lugar a todo lo que se viene exponiendo año tras año en nuestras Jornadas de Automática.

Específicamente, la edición de las actas que acompañan a este texto se ha realizado eficientemente gracias fundamentalmente a dos aspectos: la herencia recibida por el trabajo previo que nuestros compañeros de la Universidad de Valencia iniciaron en la edición anterior; y por el esfuerzo que han hecho los coordinadores de los nueve Grupos Temáticos de CEA que aglutinan a todo nuestro colectivo. Este año se ha logrado canalizar todo el proceso de recepción de trabajos, revisión, aceptación y maquetación a través de una conocida plataforma, la cual ofrece muchísimas utilidades para este tipo de eventos. A todos, muchas gracias!

Eloy Irigoyen
Responsable de relaciones con el Comité Técnico
XXXVI Jornadas de Automática

Índice de Contribuciones

Visión por Computador

Diego Manuel Martínez Gila, Julio Beltrán Ortega, Javier Gámez García and Juan Gómez Ortega. TECNOLOGÍA NO INVASIVA PARA LA DETERMINACIÓN AUTOMÁTICA DEL CONTENIDO TOTAL DE POLIFENOLES EN EL ACEITE DE OLIVA VIRGEN	1
M. Ibarra-Arenado, S. Robla-Gómez and J.M. Pérez-Oria. DETECCIÓN DE SOMBRAS EN LA CARRETERA BASADA EN PROPIEDADES CROMÁTICAS	9
Blanca Quintana, Samuel Prieto, Antonio Adán and Andrés S. Vázquez. ESCANEADO AUTOMÁTICO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE INTERIORES DE EDIFICIOS	16
César H. Rodríguez-Garavito, Carlos Guindel and José María Armingol. SISTEMA DE ASISTENCIA A LA CONDUCCION PARA DETECCION Y CLASIFICACION DE CARRILES	26
José Luis Espinosa-Aranda, Daniel Aguado-Araujo, Oscar Déniz, Jesús Salido, Gloria Bueno, Noelia Vállez, Ismael Serrano and M. Milagro Fernández-Carrobles. SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA MEDIDA DE LA TALLA DEL PIE SEGÚN PARÁMETROS DEL DISPOSITIVO BRANNOCK	32
Beatriz Alacid, Damián Mira, Pablo Gil and Fernando Torres. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA ZONA CIEGA DE UN SLAR	40
Jaime Duque Domingo, Carlos Cerrada Somolinos and Enrique Valero. LOCALIZACION DE PERSONAS MEDIANTE CAMARAS RGB-D Y REDES INALAMBRICAS	48
Daniel Aguilera Puerto, Oscar Cáceres Moreno, Diego Manuel Martínez Gila, Javier Gámez García and Juan Gómez Ortega. CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE LOTES DE ACEITUNAS EN ALMAZARA MEDIANTE VISIÓN POR COMPUTADOR	59
Carlos M. Mateo, Pablo Gil and Fernando Torres. DETECCIÓN DE DEFORMACIONES 3D CALCULANDO ESQUELETOS DE CURVATURAS	66
Silvia Satorres Martínez, Carlos Ortega Vázquez, Javier Gámez García and Juan Gómez Ortega. FUSIÓN DE CARACTERÍSTICAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD DEL ACABADO SUPERFICIAL	73
Nadia Aller-Alvarez, Laura Fernández-Robles, Victor Gonzalez Castro and Enrique Alegre. DETECCIÓN DE PLAQUITAS EN UN CABEZAL DE FRESADO USANDO CORRESPONDENCIA DE PLANTILLAS	80
Eugenio Ivorra Martínez, Antonio José Sánchez Salmerón, Samuel Verdú Amat and Raul Grau Melo. ESTIMACIÓN DE LA FRESCURA DE SPARUS AURATA (DORADA) MEDIANTE TÉCNICAS HIPERESPECTRALES EN EL RANGO DEL SW-NIR	85
Alberto Moñino Hormigo, Francisco Rodriguez Rubio and Manuel Ruiz Arahal. MONITORIZACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR MEDIANTE VISIÓN DEL PASO DE NUBES	91
Alejandro Clemotte, Miguel Velasco, Rafael Raya, Ramón Ceres and Ricardo de Córdoba. PARÁLISIS CEREBRAL Y SISTEMAS DE SEGUIMIENTO DE LA MIRADA: ¿CLIC POR PARPADEO O PERMANENCIA?	99
Yerai Berenguer, Luis Payá, Óscar Reinoso, Adrián Peidró, Luis Miguel Jiménez and Mónica Ballesta. ESTIMACIÓN DE ALTURA RELATIVA USANDO MÉTODOS BASADOS EN LA APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES	105
Juan Martín-Ávila, Miguel Martín-Guzmán, Jared Arroyo Martín, J.J. Fernández-Lozano and Alfonso García-Cerezo. NODO LÁSER INTEGRADO EN SISTEMA DE INFORMACIÓN URBANA	113

Iván De-Paz-Centeno, Eduardo Fidalgo, Oscar García-Olalla and Enrique Alegre. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BRPY: A BIORECOGNITION SYSTEM (FACE DETECTION, FACE RECOGNITION, AGE ESTIMATION AND GENDER ESTIMATION) BASED ON THE FACE	121
Iris Aguilar, Antonio J. Reina and Anthony Mandow. HERRAMIENTA PARA EL APRENDIZAJE DEL LENGUAJE DACTILOLÓGICO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL	127
Eduardo Lopez-De-Celis, Oscar García-Olalla, Maite García-Ordás and Enrique Alegre. AN EVALUATION OF CASCADE OBJECT DETECTOR AND SUPPORT VECTOR MACHINE METHODS FOR PEOPLE DETECTION USING A RGB-DEPTH CAMERA LOCATED IN A ZENITHAL POSITION	134
Luis Alberto Condezo, Mohamed Abderrahim and Silvia M. Arribas. ANÁLISIS COLORIMÉTRICO DE ALTA EFICIENCIA Y DE BAJO COSTE MEDIANTE VISIÓN POR ORDENADOR	141
Adrián de Las Matas de La Fuente, Víctor González-Castro, Laura Fernández-Robles and Enrique Alegre. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN EMBEDDED SYSTEM FOR IMAGE ACQUISITION OF INSERTS IN A HEADTOOL MACHINE	147
Paula Alvarez-Alvarez, Maite García-Ordás, Eduardo Fidalgo Fernandez and Enrique Alegre. TRACKING AND COUNTING PEOPLE FROM A ZENITHAL VIEW USING RGD-D IMAGES AND KALMAN FILTER	153

Sistemas de Tiempo Real

Ruben Perez, Adrian Orive, Eva Portillo and Marga Marcos. HACIA NXT-ROS REAL TIME: GESTOR EFICIENTE DE COMUNICACIONES PARA LEGO MINDSTORMS	159
Rafael Priego, Aintzane Armentia, Elisabet Estévez, Darío Orive, Nagore Iriondo and Marga Marcos. IMPLEMENTACIÓN DE MDE PARA LA GENERACIÓN DE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN RECONFIGURABLES	166
Emilio Salazar and Alejandro Alonso. AN AUTOMATIC SYSTEM PARTITIONING ALGORITHM FOR MIXED-CRITICALITY SYSTEMS	174
Andrés Martínez, José Enrique Simó, Patricia Balbastre and Alfons Crespo. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE PLANIFICACIÓN EN SISTEMAS PARTICIONADOS MULTI-NÚCLEO	184
Ana Guasque, Patricia Balbastre, Vicent Brocal and Alfons Crespo. ANÁLISIS DE PLANIFICABILIDAD DE SISTEMAS JERÁRQUICOS CON PLANIFICACIÓN ARBITARIA EN EL NIVEL GLOBAL	190
Aintzane Armentia, Unai Gangoiti, Rafael Priego, Elisabet Estévez, Marga Marcos and Edurne Irisarri. ASISTENCIA DOMICILIARIA ADAPTADA AL CONTEXTO: UNA APROXIMACIÓN BASADA EN MULTI-AGENTES	198
Eduardo Munera, Antonio Terrada, Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Jose-Enrique Simó-Ten and Juan Fco. Blanes Noguera. RECONFIGURACIÓN DINÁMICA BASADA EN LA CALIDAD DE SERVICIO Y DE CONTEXTO PARA UN SENSOR RGBD	206
Angel Romero, Antonio J Muñoz Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel. REALIMENTACIÓN DE VELOCIDAD CON ENCODERS DE BAJA RESOLUCIÓN EN SIMULINK	213
Alejandro Sánchez García, Jesús De La Casa Cárdenas, Elisabet Estévez, Javier Gámez García, Juan Gómez Ortega and Silvia Satorres. USO DE MDE PARA EL DISEÑO Y CODIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE PLATAFORMAS ROBÓTICAS MANIPULADORAS	221

Marcelo V Garcia, Federico Perez, Isidro Calvo, Fabian Lopez and Guadalupe Moran. DESARROLLO DE CPPS SOBRE IEC-61499 BASADO EN DISPOSITIVOS DE BAJO COSTE	230
Mykhailo Riabtsev, Rafael Priego and Marga Marcos. IMPLEMENTATION OF ROS NAVIGATION STACK ON LEGO MINDSTORMS NXT 2.0 ROBOT	238
Daniel Moya-López, José Carlos Alfonso Gil, Oriol Flors-Mas, Carlos Ariño, Alberto Martínez-Molina, Hector Beltrán and Emilio Pérez. CONTROL DE LA TENSIÓN DEL BUS DE CONTINUA DE UN FILTRO ACTIVO MEDIANTE UN CONVERTIDOR DC-DC	244
Miguel Angel Iñigo Ulloa, Isidro Calvo, Ismael Etxeberria-Agiriano and Pablo Gonzalez-Nalda. PRINCIPALES VULNERABILIDADES DE LOS SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL Y POSIBLES ACCIONES PARA EVITAR CIBERATAQUES	252

Robótica

Noé Alvarado Tovar and Raúl Suárez. SÍNTESIS DE PRENSIONES CON "FORCE-CLOSURE" PARA UN OBJETO ARTICULADO 3D CON 3 ESLABONES	260
Pedro J Sanz, Javier Perez Soler, Jorge Sales, J.Javier Fernández, Antonio Peñalver, David Fornas, Juan Carlos García Sánchez and Raul Marin. MERMANIP: AVANCES RECIENTES EN LA MANIPULACIÓN AUTÓNOMA COOPERATIVA SUBMARINA	268
Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes and Pablo Bengoa. CONTROL DE FUERZA CON COMPENSACIÓN NO LINEAL Y ESTIMACIÓN DE FUERZA DEL ROBOT HÁPTICO UHP	276
Antonio Ramón Jiménez Ruiz and Fernando Seco Granja. LOCALIZACIÓN PRECISA USANDO RADIO UWB Y DEAD-RECKONING PARA COOPERACIÓN EFICIENTE HUMANO-ROBOT	284
Igor Rodriguez Rodriguez, Aitzol Astigarraga, Ekaitz Jauregi, David Salinas, Elena Lazkano and Txelo Ruiz. ROBOTS EN UN ESCENARIO DE POESÍA IMPROVISADA	292
Juan Jesús Roldán, Jaime Del Cerro and Antonio Barrientos. MINERÍA DE PROCESOS APLICADA A LA MONITORIZACIÓN DE LAS MISIONES ROBÓTICAS	300
Fares Abu-Dakka, Ángel Valera, Juan Antonio Escalera, Álvaro Page and Mohamed Abderrahim. REHABILITACIÓN DE TOBILLO MEDIANTE APRENDIZAJE Y ADAPTACIÓN DE TRAYECTORIAS	308
Pablo J. Alhama Blanco, Fares J. Abu-Dakka, Juan A. Escalera and Mohamed Abderrahim. ACOPLAMIENTO DE PRIMITIVAS DE MOVIMIENTOS DINÁMICOS	316
Francisco Javier Badesa, Jorge Antonio Díez, Santiago Ezquerro, Arturo Bertomeu, Jose Maria Sabater and Nicolas Garcia. MÉTODOS DE CONTROL BASADOS EN CAMPOS POTENCIALES Y DE FUERZA PARA ROBÓTICA DE REHABILITACIÓN	322
Fernando Seco, Antonio Ramón Jiménez Ruiz, Ana Jiménez, César Gutiérrez and Jesús Ureña. TRANSDUCTORES BASADOS EN PELÍCULA ELECTROMECAÁNICA PARA APLICACIONES ULTRASÓNICAS EN ROBÓTICA	330
Ricardo Ragel, Ivan Maza, Fernando Caballero and Anibal Ollero. PLATAFORMA PARA EL ATERRIZAJE Y EL INTERCAMBIO DE BATERÍAS AUTOMÁTICO PARA UN UAV DE TIPO VTOL	338
Jose Navarro Alabarta, Juan Vicente Capella Hernández, Marc Bosch Jorge, Angel Soriano Viguera, Miguel Albero Gil and Angel Valera Fernández. DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA HW/SW PARA EL CONTROL DE VEHÍCULOS AUTOMÁTICOS	345

Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, Javier Serón, Jorge L. Martínez, Jesús J. Fernández-Lozano, José Manuel García-Hernández, Jesús Miranda-Páez, Anthony Mandow and Alfonso García-Cerezo. COORDINACIÓN DE UN PERRO DE RESCATE SENSORIZADO Y UAV PARA BÚSQUEDA DE VÍCTIMAS - EJERCICIO PILOTO	352
Fernando Gomez-Bravo, Raúl Jiménez Naharro, Jonathan Medina García-Naharro, Juan Antonio Gómez Galán and Manuel Sánchez Raya. SOBRE LA VULNERABILIDAD DE LOS ROBOTS MÓVILES FRENTE A LOS ATAQUES HARDWARE	358
Juan-Carlos Cobos-Torres and Mohamed Abderrahim. SISTEMA DE SUPERVISIÓN NO INVASIVO DE SIGNOS VITALES CON UN ROBOT.	366
José A. Paredes, Fernando Javier Álvarez, Jorge Morera, José Antonio Moreno and Enrique García. LOCALIZACIÓN Y POSICIONAMIENTO MEDIANTE SENSORES OLFATIVOS: REVISIÓN	371
Francisco Jose Marquez, Ivan Maza and Anibal Ollero. COMPARACIÓN DE PLANIFICADORES DE CAMINOS BASADOS EN MUESTREO PARA UN ROBOT AÉREO EQUIPADO CON BRAZO MANIPULADOR	379
Jose Guarnizo and Martin Mellado. SINCRONIZACIÓN DE MÁQUINAS DE ESTADO PARA COMPORTAMIENTOS COLABORATIVOS EN FÚTBOL DE ROBOTS	387
Álvaro Hernández, Enrique García, David Gualda, Francisco Nombela, Pablo Poudereux and José Manuel Villadangos. DISEÑO DE UNA BALIZA ULTRASÓNICA FLEXIBLE PARA SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO LOCAL	394
Adrián Peidró, Oscar Reinoso, Luis Payá, Yera Berenguer, Arturo Gil and José María Marín. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT TREPADOR CON ARQUITECTURA SERIE-PARALELA	400
Roberto Herrera, Félix R. Cañadillas, Alberto Jardón Huete and Carlos Balaguer. DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE CAMINATA PARA EL ROBOT MINI-HUMANOIDE MYOD	408
Pablo Bengoa Ganado, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Aitziber Mancisidor and Eva Portillo. CONTROL BASADO EN MODELO PARA ROBOTS PARALELOS CON SENSORIZACION REDUNDANTE	416
Javier Isabel Hernández, Félix R. Cañadillas, Alberto Jardón Huete and Carlos Balaguer. DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MINI- HUMANOIDE CON VISIÓN ARTIFICIAL	424
Joaquín Blanco Sánchez, David Álvarez Sánchez, Fernando Martin Monar and Luis Moreno Lorente. CONTACT SENSORS FOR GIFU HAND III BASED ON FORCE SENSING RESISTORS	430
Pablo Falcon, Emma Delgado, Miguel Diaz-Cacho and Antonio Barreiro. PROPUESTA DE UN SISTEMA HÁPTICO DE TELEOPERACIÓN DE 3 CANALES VÍA INTERNET	438
Ángel Delgado, Damián Mira, Carlos Alberto Jara and Fernando Torres. ESTRATEGIAS DE CONTROL BASADAS EN INFORMACIÓN TÁCTIL PARA LA MANIPULACIÓN DE OBJETOS DEFORMABLES.	446
Juan A. Escalera, Fares Abu-Dakka, Mohamed Abderrahim and Pablo Alhama. SERVIDOR LIGERO, FLEXIBLE Y GENÉRICO PARA CONTROL DE MANIPULADORES UNIVERSALES	453
Verónica González Pérez, Concepción Alicia Monje Micharet and Carlos Balaquer Bernaldo de Quirós. PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS EN UN ENTORNO AEROPORTUARIO	459

Modelado, Simulación y Optimización

Jenaro Nosedal and Miquel A. Piera. ASIGNACIÓN DE PUERTAS DE EMBARQUE CONSIDERANDO RESTRICCIONES ESPACIO-TEMPORALES MEDIANTE MODELADO CON REDES DE PETRI COLOREADAS	466
Salvador Castillo-Rivera and Maria Tomas-Rodriguez. HOVER FLIGHT HELICOPTER MODELLING AND VIBRATIONS ANALYSIS	473
Dorin Sabin Copaci, Antonio Flores Caballero, Alvaro Villoslada Peciña and Maria Dolores Blanco Rojas. MODELADO Y SIMULACIÓN DE ACTUADORES SMA CON CARGA VARIABLE	481
Paulo Mendes, Julio Normey-Rico, Carlos Bordons and Luis Valverde. GESTIÓN ENERGÉTICA DE UNA MICRO RED ACOPLADA A UN SISTEMA V2G	487
David Cerero-Tejero and Eduardo F. Camacho. SIMULADOR DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN MATLAB	495
Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch and Cesar De Prada. OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE SISTEMAS ESTACIONARIOS EN ECOSIMPRO	502
Jose Adilio Aguirre Jarquin, Gloria Gutierrez Rodriguez and Cesar De Prada Moraga. SECUENCIAMIENTO ÓPTIMO DEL PROCESO DE CRISTALIZACION DE UNA AZUCARERA	509
Ezequiel Debada, David Marcos, Carlos Montero, Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons and Miquel A. Ridao. TORQUE DISTRIBUTION STRATEGY FOR A FOUR IN-WHEEL FULLY ELECTRIC CAR	517
David Marcos, Carlos Montero, Miguel A. Ridao, Carlos Bordons and Eduardo F. Camacho. MODELADO Y CONTROL DE PAR PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON CUATRO MOTORES EN RUEDA	526
Alberto De La Calle, Lidia Roca and Javier Bonilla. INVERSIÓN DE LA CAUSALIDAD COMPUTACIONAL EN EL MODELADO DINÁMICO. CASO PRÁCTICO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO SOLAR	534
Oriol Flors-Mas, Carlos Ariño, Emilio Pérez, José Carlos Alfonso-Gil and Héctor Beltran. DISEÑO DEL CONTROL DE UN CONVERTIDOR DC-DC DE DOS ETAPAS CON UN ALGORITMO GENÉTICO	542
Alberto Martínez-Molina, Carlos Ariño, Oriol Flors-Mas, José Carlos Alfonso Gil, Daniel Moya-López, Emilio Pérez and Hector Beltrán. SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA MICRORREDES BASADO EN CONTROL PREDICTIVO	549
Sergio Jesús Navas, Francisco Rodríguez and Pedro Ollero. MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN CAMPO SOLAR CON PASO DE NUBE	556
José Manuel Bravo Caro, Diego Marín, Manuel Emilio Gegúndez and Teodoro Alamo. PREDICTOR INTERVALAR BASADO EN LA COMBINACION DE TÉCNICAS DETERMINISTAS Y ESTOCÁSTICAS	560
Alberto Pajares Ferrando, Javier Sanchis Saez and Juan Manuel Herrero Dura. PLATAFORMA DE SIMULACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO BASADO EN PILA DE COMBUSTIBLE DE TIPO PEM.	567
Sara Perez-Carabaza, Eva Besada-Portas, Jose Antonio Lopez-Orozco and Jesus M. de La Cruz Garcia. RESOLUCION DEL PROBLEMA DE BUSQUEDA EN TIEMPO MINIMO MEDIANTE COLONIAS DE HORMIGAS	575

Mayko Rannany S.Sousa, Tania Rodríguez Blanco and César de Prada. OPERACIÓN ÓPTIMA EN ECOSIMPRO® DE ESTACIONES DE REGULACIÓN Y MEDIDA DE LA RED DE GAS NATURAL	583
Sergio Corzana, Emilio Jiménez Macías, Julio Blanco Fernández, Mercedes Pérez de La Parte and Eduardo Martínez Cámara. MODELOS PARA CARACTERIZACIÓN DE NANOCOMPOSITES	591
Diego Azofra Rojo, Emilio Jiménez Macías, Eduardo Martínez Cámara, Juan Carlos Sáñez-Díez Muro and Julio Blanco Fernández. UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL COMO BASE PARA EL ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA ECONÓMICA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES SOBRE EL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL	603
Alejandro Zapata Martínez and Matilde Santos. MODELO DE SIMULACIÓN PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PORTÁTIL	609

Educación en Automática

Agustín Pérez-Castro, José Sánchez and Dictino Chaos. DESARROLLO DE UN ENTORNO ABIERTO DE EXPERIMENTACIÓN BASADO EN JAVASCRIPT PARA EL CONTROL DE UNA MAQUETA DE CUATRO TANQUES	616
Antonio José Muñoz-Ramírez, Juan Jesús Fernández-Lozano and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel. INGENIERÍA BASADA EN MODELOS EN PRÁCTICAS DE ROBÓTICA	624
Ruben Mascaró Palliser, Ramon Costa Castelló, Jesús Chacón Sombría and Sebastián Dormido Bencomo. LIBRERÍA Y LABORATORIO VIRTUAL DE UN DISPOSITIVO TWIN ROTOR	631
Álvaro Picatoste, Jorn K. Gruber, Pablo Matatagui and Milan Prodanovic. ESTUDIO DE LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA MEDIANTE UN SISTEMA DE DOMÓTICA	637
Verónica González Pérez, Raúl Pérula-Martínez, Félix Rodríguez Cañadillas, Miguel Ángel Salichs and Carlos Balaguer. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA EN ROBÓTICA EDUCATIVA PARA LA EDUCACIÓN SECUNDARIA	644
Javier Pérez, Aiman Alabdo, Gabriel J. Garcia, Jorge Pomares and Fernando Torres. VISEC-MATLAB: UNA HERRAMIENTA PARA EL APRENDIZAJE DE SISTEMAS DE CONTROL VISUAL SOBRE MATLAB	652
Juan Serrano, Blas Manuel Vinagre, Inés Tejado, Daniel Torres, Pedro A. Hungría, Vicente Feliu and Pilar Merchán. SIMULADORES BASADOS EN HERRAMIENTAS DE MODELADO FÍSICO PARA EL APOYO A LA ENSEÑANZA DE CONTROL AUTOMÁTICO (I): ROBOT MÓVIL CON BRAZO FLEXIBLE	659
Francisco Javier Álvarez García, Javier Fernández Muñoz, Shao Fu Hu Wu, Manuel Carrasco Sánchez, Eva Masero Rubio, Domingo Miguel Solomando Chamizo, Blas M. Vinagre and Inés Tejado. SIMULADORES BASADOS EN HERRAMIENTAS DE MODELADO FÍSICO PARA EL APOYO A LA ENSEÑANZA DE CONTROL AUTOMÁTICO (II): PÉNDULO ROTATORIO	667
Francisco J. Velasco González, Luis M. Vega Antolín, Elías Revestido Herrero, Francisco Javier Lastra Santos and Javier Terán Fernández. LABORATORIO MARINO REMOTO APLICADO A LA EXPERIMENTACIÓN EN TECNOLOGÍA NAVAL	674
Fernando López, Isidro Calvo, Ekaitz Zulueta, Pablo González-Nalda and Federico Pérez. DESARROLLO DE MUNDOS VIRTUALES E INTEGRACIÓN CON PROCESOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	682
Rogelio Mazaeda Echevarría, Eusebio de La Fuente López, José Luis González Sánchez and Eduardo J. Moya de La Torre. SOBRE LA DOCENCIA DE LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL	688

Raquel Romo, Rogelio Mazaeda and Rubén Martí. PLANTAS VIRTUALES BASADAS EN ARDUINO PARA LABORATORIO DOCENTE DE INFORMÁTICA INDUSTRIAL	696
Raquel Martínez Rodríguez, Jose Morgado Nisa and Eloy Irigoyen Gordo. LAS INTELIGENCIAS MÚLTIPLES EN LAS ENSEÑANZAS DE INGENIERÍA: UN CASO DE ESTUDIO EN ROBÓTICA	704
Antonio Javier Barragán Piña, Yolanda Ceada Garrido, José Manuel Andújar Márquez, Eloy Irigoyen Gordo, Vicente Gómez Garay y Vicente Artaza Fano. UNA PROPUESTA PARA LA MOTIVACIÓN DEL ALUMNADO DE INGENIERÍA MEDIANTE TÉCNICAS DE GAMIFICACIÓN	710

Control Inteligente

Eukene Imatz Ojanguren, Eloy Irigoyen, David Valencia Blanco, Haritz Zabaleta and Thierry Keller. USO DE REDES NEURO-BORROSAS RFNN PARA LA APROXIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA NEUROPRÓTESIS DE ANTEBRAZO EN PACIENTES CON DAÑO CEREBRAL	716
Antonio Javier Barragán Piña, Miguel Ángel Martínez Bohórquez, José Manuel Andújar Márquez and Antonio José Calderón Godoy. REGULACIÓN EN LÍNEA DE SISTEMAS ESTOCÁSTICOS MEDIANTE LÓGICA BORROSA	724
Jose Alcalá, Jesus Urena, Alvaro Hernandez and Juan Jesús García. ANÁLISIS NO INTRUSIVO DE LA ACTIVIDAD HUMANA A TRAVÉS DE LA MONITORIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO	731
Ayoze Marrero Ramos, Juan Mendez, G. González, Jose Rebozo, Ana Fragoso, Isabel Martín and María Del Carmen Martín Lorenzo. SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO DE ANESTESIA BASADO EN LÓGICA DIFUSA	737
Ander Arriandiaga, Eva Portillo, Jose Antonio Sánchez, Itziar Cabanes and Asier Zubizarreta. MODELADO DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA DE CORTE EN EL RECTIFICADO MEDIANTE REDES NEURONALES RECURRENTE	744
Urko Gómez, Eloy Irigoyen, Vicente Gómez-Garay and Fernando Artaza. PRIMEROS RESULTADOS EN EL ESTUDIO DE SOLUCIONES BASADAS EN NEUROCONTROL PARA UN PUENTE GRUA	751

Bioingeniería

Maite Valderas, Montserrat Vallverdu, Pere Caminal, Andreas Voss and Rico Schröder. EXTRACCIÓN DE LA SEÑAL DE RESPIRACIÓN A PARTIR DEL ELECTROCARDIOGRAMA	759
Álvaro Costa, Guillermo Asín-Prieto, Shingo Shimoda, Eduardo Iáñez, Juan C. Moreno, Jose L. Pons and Jose M. Azorin. INTEGRACIÓN DE INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADOR Y EXOSQUELETO DE MIEMBRO INFERIOR ORIENTADO A LA REHABILITACIÓN	766
Andrés Belda, Enrique Hortal, Andrés Úbeda, Álvaro Costa and Jose M. Azorin. CONTROL DE UN ROBOT HUMANOIDE MEDIANTE EL USO DE UNA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADOR	773
Lidia Santos, José L. González, Javier P. Turiel, Juan C. Fraile and Eusebio de La Fuente. GUANTE DE DATOS SENSORIZADO PARA USO EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA ASISTIDA POR LA MANO (HALS)	779

Santiago Ezquerro García, Irene Delegido Bernabe, Arturo Bertomeu Motos, Jorge Diez Pomares, Francisco Javier Badesa and Nicolás García Aracil. VALORACIÓN ARTICULAR DEL MIEMBRO SUPERIOR EMPLEANDO EL DISPOSITIVO ROBÓTICO PUPARM MEDIANTE UN ALGORITMO DE RECONSTRUCCIÓN CINEMÁTICA	786
Irene Rivas Blanco, Víctor Fernando Muñoz Martínez, Isabel García-Morales, Giuseppe Tortora and Arianna Menciassi. ARQUITECTURA DE CONTROL DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA SIN REALIMENTACIÓN DE POSICIÓN ARTICULAR PARA CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA	793
Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos. PROCESAMIENTO PARALELO DE IMÁGENES DE VIDEO PARA LA DETECCIÓN DE SANGRADO Y VENDAS EN OPERACIONES DE CIRUGÍA LAPAROSCOPICA	801
Unai Zalabarria, Eloy Irigoyen, Asier Salazar and Raquel Martinez. PROCESAMIENTO ROBUSTO PARA EL ANÁLISIS AVANZADO DE SEÑALES ELECTROCARDIOGRÁFICAS AFECTADAS POR PERTURBACIONES	807
Enrique Bauzano, Asier Fernández-Iribar, Mari Carmen López-Casado, Julius Klein, Arantxa Rentería and Victor Muñoz Martinez. INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS EN UN ROBOT QUIRÚRGICO TELEOPERADO MEDIANTE ROS	815

Automar

Jorge Sales, Miquel Massot Campos, Pep Lluís Negre Carrasco, Gabriel Oliver Codina and Pedro J. Sanz. INTEGRACIÓN DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE RECONSTRUCCIÓN 3D PARA MEJORAR LA PLANIFICACIÓN DE AGARRES EN TAREAS DE MANIPULACIÓN ARQUEOLÓGICA SUBACUÁTICA	823
Pere Ridao Rodriguez, Marc Carreras Perez, David Ribas Romagos, Nuno Gracias and Rafael Garcia Campos. SURVEY AND INTERVENTION HROV	830
Marina P. Portilla, Montserrat Espin, Jose A. Somolinos, Amable Lopez and Rafael Morales. ARQUITECTURA DE CONTROL DE UN DISPOSITIVO SUBMARINO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LAS CORRIENTES MARINAS	836
Antoni Burquera and Gabriel Oliver. BUILDING HIGH RESOLUTION MAPS OF LARGE SUBSEA AREAS USING SIDE-SCAN SONAR	842
David Moreno-Salinas, Eva Besada-Portas, José Antonio López-Orozco, Dictino Chaos, Joaquín Aranda and Jesús Manuel de La Cruz. IDENTIFICACIÓN DE UN MODELO NO LINEAL DE UN VEHÍCULO MARINO DE SUPERFICIE USANDO REGRESIÓN SIMBÓLICA	850
Eduardo M. Rubino, Diego Centelles, Jorge Sales, Jose Vicente Marti, Raul Marin and Pedro J. Sanz. IMAGE COMPRESSION WITH REGION OF INTEREST FOR UNDERWATER ROBOTIC ARCHAEOLOGICAL APPLICATIONS	856
Irene Irene Olivares Sánchez-Mellado and Matilde Santos. SIMULACIÓN Y MODELIZACIÓN DE LAS MAREAS Y ANÁLISIS DE SU APROVECHAMIENTO POR UNA TURBINA DE MAR	864

Ingeniería de Control

Jose Luis Sampietro, Ramon Costa Castelló and Vicenç Puig Cayuela. CONTROL PREDICTIVO ECONOMICO DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE	871
Carlos Rodríguez, José Luis Guzmán, Manuel Berenguel and Sebastián Dormido. DISEÑO DE CONTROLADORES POR ADELANTO PARA COMPENSACIÓN DE PERTURBACIONES MEDIBLES TIPO IMPULSO	880

Gonzalo Hernandez, Carlos Bordons, David Marcos and Carlos Montero. CONTROL DE ESTABILIDAD BASADO EN MPC PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON MOTORES EN RUEDA	887
Daniel Dolz, Ignacio Peñarrocha and Roberto Sanchis. ESTIMACIÓN POR PLANIFICACIÓN DE GANANCIAS CON TRANSMISIONES SIN ACUSE DE RECIBO	895
Maria Isabel Sarachaga, Arantzazu Burgos, Maria Luz Alvarez, Elisabet Estévez and Marga Marcos. UN ENFOQUE METODOLÓGICO PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN RECONFIGURABLES	903
Javier Rico-Azagra, Ramon Rico, Paloma Maisterra and Montserrat Gil-Martinez. COMPARACIÓN DE ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE ACTITUD	911
Álvar Sánchez Fernández, Maria Jesus Fuente and Gregorio Ismael Sainz-Palmero. DETECCIÓN DE FALLOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE PCA DISTRIBUIDO	921
Inari Badillo, Josu Jugo, Joaquin Portilla, Jorge Feuchtwanger, Carlos San Vicente and Victor Etxebarria. TÉCNICAS NOVEDOSAS PARA CONTROL Y DIAGNÓSTICO ORIENTADO A ACELERADORES DE PARTÍCULAS	929
Juan Diego Gil, Alba Ruiz-Aguirre, Lidia Roca, Guillermo Zaragoza, Manuel Berenguel and Jose Luis Guzman. CONTROL DE PLANTAS DE DESTILACIÓN POR MEMBRANAS CON APOYO DE ENERGÍA SOLAR – PARTE 1: ESQUEMAS	937
Juan Diego Gil, Alba Ruiz-Aguirre, Lidia Roca, Guillermo Zaragoza, Manuel Berenguel and Jose Luis Guzman. CONTROL DE PLANTAS DE DESTILACIÓN POR MEMBRANAS CON APOYO DE ENERGÍA SOLAR – PARTE 2: RESULTADOS	944
David Rodríguez, José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega and Fernando Castaño. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE UNA PLANTA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN	951
Fernando Morilla, Francisco Vazquez, David Rodriguez, Juan Garrido and Sergio Frago. RANGO DE OPERACIÓN EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR	959
Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and Daniel Dolz Algaba. DETECCIÓN DE FALLOS EN LA ORIENTACIÓN DE PALAS EN AEROGENERADORES MEDIANTE OBSERVADORES H2 TIPO PI	966
Ramon Rico, Paloma Maisterra, Montserrat Gil-Martínez, Javier Rico-Azagra and Silvano Nájera. IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE UN CUATRIRROTOR	973
Olivia Neila, Samira Roshany-Yamchi, Bartłomiej Gnyszka, Daniel Limón and Juan Manuel Escaño. CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO EN UN PLC SIEMENS SIMATIC S7-1200	983
Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio E Normey-Rico. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ENERGÍAS RENOVABLES EN UNA PLATAFORMA HÍBRIDA EN ALTA MAR	989
Jesús M. Zamarreño, María J. Fuente and Luis F. Acebes. DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID ACCESIBLE COMO SERVIDOR OPC	997
Pablo Cano Marchal, Javier Gámez García and Juan Gómez Ortega. SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN BASADO EN MAPAS BORROSOS COGNITIVOS Y CONTROL RUN-TO-RUN PARA LA DETERMINACIÓN DE PUNTOS DE OPERACIÓN	1001
Ignacio Santín, Carles Pedret and Ramón Vilanova. EFFLUENT PREDICTIONS IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS FOR THE CONTROL STRATEGIES SELECTION	1009
Mario L. Ruz, Félix A. Berlanga, Francisco Vázquez, Manuel Ruiz de Adana, Miguel Zamora and Adoración Cerezueta. SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA MÁQUINAS DE REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN	1017

Montse Meneses and Ramon Vilanova. ENVIRONMENTAL EVALUATION OF CONTROL STRATEGIES FOR WASTEWATER TREATMENT PLANT OPERATION	1025
F. Javier García, Eduardo J. Moya and Alfonso Poncela. DETECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS BLUETOOTH PARA CONTROL DE ACCESO	1034
María Macarena Sevilla, David Bárcena, Iñaki Díaz, Emilio Sánchez and Jorge Juan Gil. CONTROL DE UN SISTEMA NO LINEAL CON RETRASO VENTILADOR-PLACA	1042
Pablo González-Nalda, Isidro Calvo, Ismael Etxeberria-Agiriano, Ekaitz Zulueta and José Manuel López-Guede. HACIA UN FRAMEWORK BASADO EN ROS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS	1050
Alfonso Poncela, Eduardo J. Moya and F. Javier García. DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SCADA EN .NET ORIENTADA AL CONTROL Y SUPERVISIÓN DE LAS MAQUETAS MT-542 Y MD-544 CON EASYPORT DE FESTO Y PC	1058
Marian Barbu, Emil Ceanga, Ramon Vilanova and Orlando Arrieta. ROBUST CONTROL SOLUTIONS TO REDUCE THE INFLUENCE OF INFLUENT VARIATIONS ON A WASTEWATER TREATMENT PLANT	1066
José Miguel Gutiérrez Guerrero and Juan Antonio Holgado Terriza. MOBILE HUMAN MACHINE INTERFACE BASED IN OPC UA FOR THE CONTROL OF INDUSTRIAL PROCESSES.	1073
Fernandez Marron Jose Luis, Blazquez Martinez Juan and José Miguel Barcala. USO DE LA REDUNDANCIA DE SENSORES PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE MALFUNCIONES	1081
Lily Ellebracht and Vicenç Puig. AUTOMATIC, IN-BIN GRAIN DRYING USING MODEL PREDICTIVE CONTROL	1085

ANÁLISIS CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT TREPADOR CON ARQUITECTURA SERIE-PARALELA

A. Peidró, Ó. Reinoso, L. Payá, Y. Berenguer, A. Gil, J. M. Marín

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad Miguel Hernández. Avda. de la Universidad s/n. 03202, Elche (Alicante), España
{apeidro, o.reinoso, lpaya, yberenguer, arturo.gil, jmarin}@umh.es

Resumen

Este artículo presenta un nuevo robot trepador para explorar y realizar tareas de inspección y mantenimiento en estructuras reticuladas tridimensionales. El robot es bípedo y posee una arquitectura híbrida serie-paralela, ya que cada pata es la combinación serie de dos mecanismos paralelos. En primer lugar se resuelve la cinemática directa del robot, obteniendo la posición y orientación relativa entre los pies en función de las diez coordenadas articulares del robot. El problema cinemático inverso es más complicado debido a la redundancia del robot. Para simplificar dicho problema, se estudia un caso particular de la cinemática inversa en el que el robot presenta movimientos planos y posturas simétricas. Finalmente, se presenta una herramienta que permite simular la cinemática directa del robot y verificar su movilidad y su capacidad para moverse por estructuras, incluso cuando se impone la restricción de que algunos movimientos sean planos y simétricos.

Palabras clave: Robots bípedos, Robots trepadores, Robots híbridos, Robots redundantes

1. INTRODUCCIÓN

Muchas estructuras verticales requieren tareas de inspección y mantenimiento. Por ejemplo, las cristalerías de grandes edificios deben ser limpiadas periódicamente [12], y las uniones soldadas de los esqueletos metálicos de los edificios requieren inspección [2]. Tales tareas son peligrosas debido a diversos riesgos como la caída de altura, la contaminación (p.e. en trabajos en plantas nucleares o químicas), o la electrocución (p.e. durante el mantenimiento de líneas eléctricas aéreas). Durante los últimos años, muchos investigadores han tratado de reducir estos riesgos proponiendo robots trepadores que realicen estas peligrosas tareas en lugar de las personas. El lector interesado puede encontrar en [7] una exhaustiva recopilación de la mayoría de robots trepadores propuestos hasta la fecha, clasificados en función de sus tecnologías de adhesión y de locomoción, así como un análisis de los criterios de diseño de este tipo de robots.

Un tipo especial de estructuras verticales son las estructuras reticuladas tridimensionales, presentes en construcciones como puentes metálicos, torres eléctricas y de telecomunicación, aeropuertos, o estadios. Estas estructuras están formadas por la interconexión de diversas barras con distintas orientaciones espaciales. Para alcanzar el elevado grado de movilidad necesario para explorar estas estructuras, los robots trepadores suelen disponer de dos garras unidas mediante una cadena cinemática de varios Grados de Libertad (GDL). El modo de locomoción de estos robots consiste en fijar una de las garras a la estructura y utilizar la cadena cinemática para posicionar y orientar la garra libre en otro punto de agarre de la estructura. A continuación, la garra libre se sujeta a la estructura, y la garra que antes estaba fija se libera, convirtiéndose en la nueva garra libre. De esta forma, estos robots avanzan por la estructura alternando los papeles de sus garras. Mientras el robot está sujeto a la estructura se comporta como un manipulador clásico, donde la garra fija es la base del manipulador y la garra libre es su efector final.

Los robots trepadores de estructuras 3D se clasifican según la arquitectura de la cadena cinemática que conecta sus garras, que puede ser serie, paralela, o híbrida [9]. Los robots serie presentan un mayor espacio de trabajo, pero tienen menor capacidad de carga y rigidez. Dos ejemplos de robots trepadores serie con 6 y 4 GDL se presentan en [2] y [9], respectivamente. Otros autores proponen robots serie inspirados en orugas, con 5 y 8 GDL [4, 8], y también robots modulares cuyo número de GDL puede modificarse añadiendo más módulos en serie [6]. También es destacable el robot presentado en [11], capaz de explorar estructuras 3D usando sólo 3 GDL, o capaz de combinarse en serie con otros robots similares para formar robots más complejos con mayor movilidad.

Las arquitecturas paralelas también han sido estudiadas. Éstas ofrecen una mayor rigidez y relación capacidad de carga/peso que los robots serie, pero su espacio de trabajo es más limitado y contiene singularidades. En [1] se presenta un robot trepador cuyo cuerpo central es una plataforma de Gough-Stewart. Dicho robot puede trepar por

estructuras 3D, redes de tuberías, o árboles.

Finalmente, los robots trepadores híbridos están formados por varios mecanismos paralelos conectados en serie, y presentan las ventajas de las arquitecturas previas: el amplio espacio de trabajo de los robots serie y la elevada rigidez y capacidad de carga de los robots paralelos. En [10] se presenta un robot trepador formado por un mecanismo paralelo de tipo 3-RPR conectado en serie a un módulo de rotación. Otro robot trepador híbrido y bípedo de 12 GDL se presenta en [3]; en este caso cada pata del robot está formada por dos mecanismos paralelos de tipo 3-RPS conectados en serie.

Este artículo presenta un nuevo robot trepador híbrido de 10 GDL. El robot consta de dos patas unidas a una cadera mediante articulaciones de rotación, estando cada pata formada por dos mecanismos paralelos conectados en serie. El diseño de las patas permite al robot ejecutar fácilmente los movimientos típicos requeridos para explorar estructuras 3D, como cambios entre planos con distinta orientación. En este artículo se resuelve la cinemática directa de este robot, así como un caso particular de la cinemática inversa que permite alcanzar algunas posturas necesarias para avanzar por estructuras 3D. También se presenta un simulador que permite verificar las soluciones obtenidas y demostrar la movilidad del robot.

Este artículo se organiza como sigue. La Sección 2 describe la arquitectura del robot. Seguidamente, la Sección 3 presenta la solución de la cinemática directa del robot completo. A continuación, la Sección 4 analiza una versión simplificada, aunque útil, de la cinemática inversa. La Sección 5 presenta una herramienta que permite simular la cinemática directa del robot para validar los análisis anteriores y verificar la movilidad del mecanismo. Finalmente, la Sección 6 resume las conclusiones.

2. DISEÑO DEL ROBOT

En la Figura 1 se muestra un modelo CAD del robot propuesto. El robot dispone de dos patas idénticas A y B , conectadas a la cadera C a través de articulaciones de rotación (θ_A y θ_B) gobernadas por motores. Cada pata $j \in \{A, B\}$ consta de un cuerpo central C_j y dos plataformas con forma de U (P_{1j} y P_{2j}). Las plataformas P_{1A} y P_{1B} son los pies del robot y transportan las garras (o imanes/ventosas) con las que éste se sujeta a la estructura (las cuales no serán consideradas en el análisis presentado en este artículo). Las plataformas P_{2A} y P_{2B} están conectadas a la cadera mediante las citadas articulaciones de rotación.

Cada plataforma está conectada al cuerpo central de la pata correspondiente mediante una guía pa-

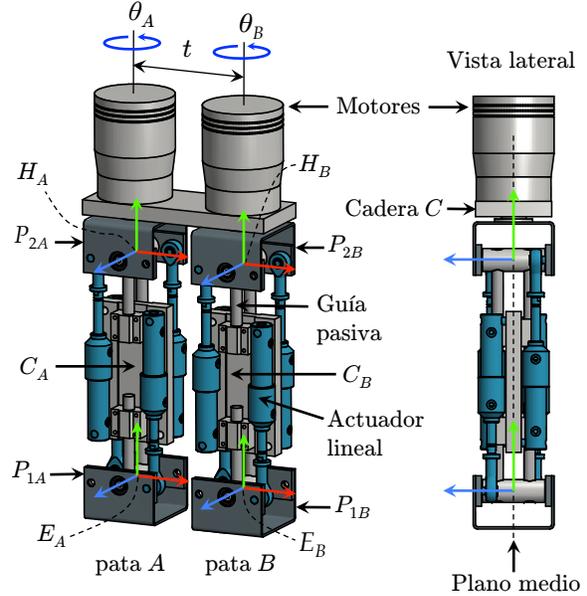


Figura 1: Modelo CAD del robot trepador.

siva y dos actuadores lineales dispuestos en paralelo, constituyendo el mecanismo paralelo de 2 GDL representado en la Figura 2. De esta forma, cada pata es la combinación serie de dos mecanismos paralelos de este tipo. Los actuadores lineales de cada mecanismo paralelo se encuentran a diferentes lados del cuerpo central de la pata (esto se indica en la Figura 3 mediante línea discontinua).

En la Figura 1 también se representan algunos sistemas de referencia solidarios a diferentes elementos del robot. En este artículo, los ejes X , Y , y Z de los sistemas de referencia se representarán mediante los colores rojo, verde, y azul, respectivamente. Los sistemas de referencia H_A y H_B son solidarios a la cadera, mientras que los sistemas E_A y E_B son solidarios a los pies de las patas A y B , respectivamente. Los orígenes de los sistemas de referencia H_j y E_j están contenidos en el plano medio de la pata j , indicado en la Figura 1.

En total, el robot tiene 10 GDL entre los pies: las rotaciones de la cadera (θ_A y θ_B) y los cuatro actuadores lineales de cada pata. Dado que bastan 6 GDL para posicionar y orientar un pie con respecto al otro, se trata de un robot redundante.

3. CINEMÁTICA DIRECTA

En esta sección se analiza la cinemática directa del robot trepador. Definimos este problema como el cálculo de la *pose* (= posición y orientación) de un pie del robot con respecto al otro pie en función de las 10 coordenadas articulares: los ángulos θ_A y θ_B y las longitudes (l_{ij} , r_{ij}) de los actuadores lineales de los mecanismos paralelos. En primer lugar es

necesario resolver la cinemática directa de dichos mecanismos paralelos.

3.1. CINEMÁTICA DIRECTA DE LOS MECANISMOS PARALELOS

La Figura 2 muestra el mecanismo paralelo i de la pata j ($i \in \{1, 2\}$, $j \in \{A, B\}$). Cada mecanismo paralelo es un mecanismo plano de 2 GDL compuesto por una plataforma móvil conectada a una base mediante dos actuadores lineales con longitudes l_{ij} y r_{ij} . La plataforma únicamente puede trasladarse verticalmente y rotar, debido a que está restringida por una guía vertical pasiva.

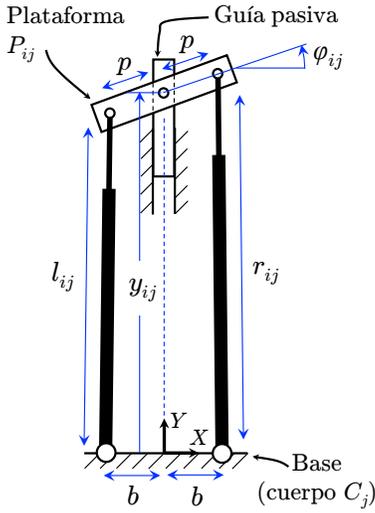


Figura 2: Mecanismo paralelo que forma las patas del robot.

La cinemática directa de los mecanismos paralelos consiste en calcular la posición y_{ij} y la orientación φ_{ij} de la plataforma en función de las longitudes l_{ij} y r_{ij} . De la Figura 2 se desprende la relación entre estas variables:

$$(p \cos \varphi_{ij} - b)^2 + (y_{ij} + p \sin \varphi_{ij})^2 = r_{ij}^2 \quad (1)$$

$$(p \cos \varphi_{ij} - b)^2 + (y_{ij} - p \sin \varphi_{ij})^2 = l_{ij}^2 \quad (2)$$

Estas ecuaciones pueden combinarse para obtener un sistema equivalente más sencillo. Sumando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la ecuación (3). Por otra parte, restando la ecuación (2) de la ecuación (1) se obtiene la ecuación (4):

$$4bp \cos \varphi_{ij} = 2y_{ij}^2 + 2b^2 + 2p^2 - l_{ij}^2 - r_{ij}^2 \quad (3)$$

$$4y_{ij}p \sin \varphi_{ij} = r_{ij}^2 - l_{ij}^2 \quad (4)$$

De la ecuación (3) se despeja $\cos \varphi_{ij}$:

$$\cos \varphi_{ij} = \frac{2y_{ij}^2 + 2b^2 + 2p^2 - l_{ij}^2 - r_{ij}^2}{4bp} \quad (5)$$

Elevando al cuadrado la ecuación (4):

$$16y_{ij}^2 p^2 (1 - \cos^2 \varphi_{ij}) = (r_{ij}^2 - l_{ij}^2)^2 \quad (6)$$

Sustituyendo (5) en (6) proporciona una ecuación cúbica en $\Upsilon_{ij} = y_{ij}^2$:

$$\Upsilon_{ij}^3 + k_2^{ij} \Upsilon_{ij}^2 + k_1^{ij} \Upsilon_{ij} + k_0^{ij} = 0 \quad (7)$$

donde:

$$k_2^{ij} = 2b^2 + 2p^2 - l_{ij}^2 - r_{ij}^2 \quad (8)$$

$$k_1^{ij} = \left[(b+p)^2 - \frac{l_{ij}^2 + r_{ij}^2}{2} \right] \left[(b-p)^2 - \frac{l_{ij}^2 + r_{ij}^2}{2} \right] \quad (9)$$

$$k_0^{ij} = b^2(l_{ij} + r_{ij})^2(l_{ij} - r_{ij})^2/4 \quad (10)$$

La ecuación (7) siempre tiene tres raíces (dos de ellas podrían ser complejas). Dada una raíz $\Upsilon_{ij} > 0$, se obtienen dos soluciones para $y_{ij} = \pm \sqrt{\Upsilon_{ij}}$. Para cada una de estas soluciones, $\cos \varphi_{ij}$ se calcula de (5), mientras que $\sin \varphi_{ij}$ se obtiene de (4):

$$\sin \varphi_{ij} = \frac{r_{ij}^2 - l_{ij}^2}{4y_{ij}p} \quad (11)$$

Una vez se conocen $\cos \varphi_{ij}$ y $\sin \varphi_{ij}$, φ_{ij} queda inequívocamente determinado en $(-\pi, \pi]$. En [5] se demostró, mediante el Teorema de Sturm, que (7) no puede tener más de dos raíces positivas. Dado que cada raíz positiva de (7) resulta en dos pares (y_{ij}, φ_{ij}) diferentes, la cinemática directa de cada mecanismo paralelo tiene 4 soluciones como máximo [5].

Nótese que intercambiar los valores de r_{ij} y l_{ij} no afecta a (7) ni a (5), pero sí modifica el signo de $\sin \varphi_{ij}$ en (11). Por tanto, intercambiar r_{ij} y l_{ij} cambia el signo de φ_{ij} sin afectar a y_{ij} . Esto también puede observarse en la Figura 2, donde intercambiar r_{ij} y l_{ij} es equivalente a rotar dicha figura π rad alrededor del eje Y . Esto se explotará en la Sección 4 para analizar la cinemática inversa del robot.

3.2. CINEMÁTICA DIRECTA DEL ROBOT COMPLETO

La cinemática directa del robot completo consiste en calcular la pose relativa entre los pies del robot en función de las 10 coordenadas articulares. Este problema se resolverá empleando matrices de transformación homogénea. En este artículo, la matriz de transformación homogénea que codifica la pose de un sistema de referencia m relativa a otro sistema de referencia n se denotará por $\mathbf{T}_{m/n}$.

La Figura 3 muestra una pata genérica $j \in \{A, B\}$ del robot. Cada pata es la combinación serie de

dos mecanismos paralelos. El cuerpo central de la pata (C_j) es la base de los mecanismos paralelos. La plataforma del mecanismo paralelo 1 (P_{1j}) es el pie de la pata, mientras que la plataforma del mecanismo paralelo 2 (P_{2j}) está conectada a la cadera C a través de una articulación de rotación (giro θ_j). Las variables ($y_{1j}, \varphi_{1j}, y_{2j}, \varphi_{2j}$) se obtienen a partir de ($l_{1j}, r_{1j}, l_{2j}, r_{2j}$) resolviendo la cinemática directa de los mecanismos paralelos, según se explica en la Sección 3.1. Los planos XY de todos los sistemas de referencia mostrados en la Figura 3 coinciden con el plano medio de la pata, indicado en la Figura 1.

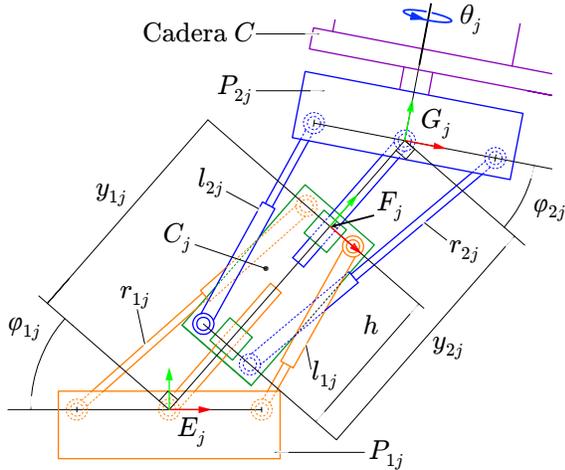


Figura 3: Esquema de la pata $j \in \{A, B\}$.

De acuerdo a la Figura 3, la pose del sistema de referencia F_j (solidario al cuerpo central de la pata) relativa al sistema E_j (solidario al pie) es:

$$\mathbf{T}_{F_j/E_j} = \begin{bmatrix} c_{\varphi_{1j}} & s_{\varphi_{1j}} & 0 & y_{1j}s_{\varphi_{1j}} \\ -s_{\varphi_{1j}} & c_{\varphi_{1j}} & 0 & y_{1j}c_{\varphi_{1j}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

donde $s_x = \sin x$ y $c_x = \cos x$. La pose del sistema de referencia G_j (solidario a la plataforma del mecanismo paralelo 2) relativa al sistema F_j es:

$$\mathbf{T}_{G_j/F_j} = \begin{bmatrix} c_{\varphi_{2j}} & -s_{\varphi_{2j}} & 0 & 0 \\ s_{\varphi_{2j}} & c_{\varphi_{2j}} & 0 & y_{2j} - h \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde h es un parámetro geométrico mostrado en la Figura 3. Finalmente, la pose del sistema H_j (solidario a la cadera del robot) con respecto al sistema G_j se puede escribir de la siguiente forma:

$$\mathbf{T}_{H_j/G_j} = \begin{bmatrix} c_{\theta_j} & 0 & s_{\theta_j} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\theta_j} & 0 & c_{\theta_j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde θ_j es el ángulo que hay que rotar el sistema G_j alrededor de su eje Y para alinear dicho sistema con el sistema H_j (mostrado en la Figura 1). Multiplicando las matrices anteriores se obtiene la pose del sistema H_j relativa al sistema E_j :

$$\mathbf{T}_{H_j/E_j} = \mathbf{T}_{F_j/E_j} \mathbf{T}_{G_j/F_j} \mathbf{T}_{H_j/G_j} \quad (15)$$

Una vez resuelta la cinemática directa de cada pata individual, la pose del pie $k \in \{A, B\} \setminus \{j\}$ con respecto al pie j puede calcularse como sigue:

$$\mathbf{T}_{E_k/E_j} = \mathbf{T}_{H_j/E_j} \mathbf{T}_{H_k/H_j} \mathbf{T}_{E_k/H_k} \quad (16)$$

donde $\mathbf{T}_{E_k/H_k} = (\mathbf{T}_{H_k/E_k})^{-1}$ y \mathbf{T}_{H_k/H_j} codifica la pose del sistema H_k con respecto al sistema H_j :

$$\mathbf{T}_{H_k/H_j} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{t}_{H_k/H_j} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

La matriz \mathbf{T}_{H_k/H_j} es constante porque ambos sistemas de referencia son solidarios al mismo sólido rígido (la cadera). \mathbf{I} es la matriz identidad de tamaño 3×3 . Además, según la Figura 1: $\mathbf{t}_{H_B/H_A} = [t, 0, 0]^T = -\mathbf{t}_{H_A/H_B}$, donde t es la distancia entre los ejes de las rotaciones de la cadera.

En teoría, la cinemática directa del robot completo tiene $4^4 = 256$ soluciones distintas. Esto se debe a que la cadena cinemática que conecta los pies del robot consta de 4 mecanismos paralelos conectados en serie, y el problema cinemático directo de cada mecanismo paralelo tiene 4 soluciones reales como máximo.

4. CINEMÁTICA INVERSA

La cinemática inversa consiste en calcular los valores de las coordenadas articulares que permiten alcanzar una determinada pose relativa entre los pies del robot. Es necesario resolver este problema para poder planificar los movimientos del robot. En este robot se emplean 10 coordenadas articulares para posicionar y orientar un pie con respecto al otro, por tanto se trata de un robot redundante y la cinemática inversa tendrá infinitas soluciones.

Debido a la redundancia, la cinemática inversa general de este robot no es un problema sencillo. No obstante, muchos movimientos necesarios para explorar estructuras 3D (p.e. avanzar a lo largo de una viga o realizar cambios de plano) pueden ejecutarse empleando la configuración simplificada analizada en esta sección, en la cual se reduce el número de incógnitas y la cinemática inversa se simplifica notablemente.

La configuración analizada en esta sección se representa en la Figura 4, donde el pie j está fijo a la estructura y el pie k está libre ($j, k \in \{A, B\}, j \neq k$).

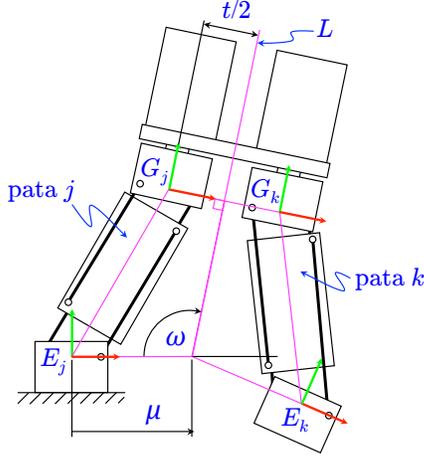


Figura 4: Configuración del robot en el problema Cinemático Inverso Simétrico y Plano (CISP).

k). Se asume que los ejes Z de los sistemas de referencia solidarios a los pies son paralelos y apuntan en la misma dirección (hacia el lector, según la Figura 4), y que los planos XY de los sistemas de referencia E_j y E_k son coincidentes. En esta situación, cualquier variación en la longitud de los actuadores lineales de los mecanismos paralelos únicamente produce movimientos planos del sistema de referencia E_k dentro del plano XY del sistema E_j . En tal caso, la pose del sistema E_k relativa al sistema E_j puede calcularse como sigue:

$$\mathbf{T}_{E_k/E_j} = \mathbf{T}_{G_j/E_j} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & [t, 0, 0]^T \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{T}_{G_k/E_k})^{-1} \quad (18)$$

donde $\mathbf{T}_{G_j/E_j} = \mathbf{T}_{F_j/E_j} \mathbf{T}_{G_j/F_j}$. También se asume que las coordenadas articulares de los mecanismos paralelos verifican la siguiente relación:

$$l_{ik} = r_{ij} \quad r_{ik} = l_{ij} \quad (i = 1, 2) \quad (19)$$

que significa que el mecanismo paralelo i de la pata k y el mecanismo paralelo i de la pata j tienen sus coordenadas articulares intercambiadas. Según la Sección 3.1, esto se traduce en:

$$y_{ik} = y_{ij} \quad \varphi_{ik} = -\varphi_{ij} \quad (i = 1, 2) \quad (20)$$

Se puede comprobar fácilmente de forma gráfica que la condición (20) implica que las patas k y j adoptan posturas simétricas con respecto a la línea L , que es el eje de simetría de la cadera. Sustituyendo (20) en (18) permite escribir la matriz \mathbf{T}_{E_k/E_j} únicamente en función de las variables de la pata fija j , obteniéndose la siguiente expresión:

$$\mathbf{T}_{E_k/E_j} = \begin{bmatrix} -c_{2\omega} & -s_{2\omega} & 0 & 2\mu \cdot s_{\omega}^2 \\ s_{2\omega} & -c_{2\omega} & 0 & \mu \cdot s_{2\omega} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

donde:

$$\omega = \varphi_{1j} - \varphi_{2j} + \pi/2 \quad (22)$$

$$\mu = [0,5 \cdot t + (y_{1j} + y_{2j} - h)s_{\varphi_{2j}}] / s_{\omega} \quad (23)$$

Por tanto, bajo la condición de movimientos planos y simétricos, la pose del pie k con respecto al pie j queda parametrizada por dos parámetros μ y ω , definidos en la Figura 4. Definimos el problema Cinemático Inverso Simétrico y Plano (CISP) como el cálculo de las coordenadas articulares $(l_{1j}, r_{1j}, l_{2j}, r_{2j})$ necesarias para alcanzar una pose deseada (μ, ω) . Dado que las coordenadas articulares no aparecen explícitamente en las ecuaciones (22)-(23), es necesario incluir las ecuaciones de los mecanismos paralelos de la pata j :

$$(p \cos \varphi_{1j} - b)^2 + (y_{1j} + p \sin \varphi_{1j})^2 = r_{1j}^2 \quad (24)$$

$$(p \cos \varphi_{1j} - b)^2 + (y_{1j} - p \sin \varphi_{1j})^2 = l_{1j}^2 \quad (25)$$

$$(p \cos \varphi_{2j} - b)^2 + (y_{2j} + p \sin \varphi_{2j})^2 = r_{2j}^2 \quad (26)$$

$$(p \cos \varphi_{2j} - b)^2 + (y_{2j} - p \sin \varphi_{2j})^2 = l_{2j}^2 \quad (27)$$

Por tanto, realmente el problema CISP consiste en resolver $(l_{1j}, r_{1j}, l_{2j}, r_{2j}, y_{1j}, \varphi_{1j}, y_{2j}, \varphi_{2j})$ del sistema formado por las ecuaciones (22) a (27). Al igual que el problema cinemático inverso general, el problema CISP está indeterminado debido a la redundancia, y requiere calcular 8 incógnitas de 6 ecuaciones. Sin embargo, el problema CISP involucra menos incógnitas y ecuaciones más simples.

En la próxima sección se mostrará que algunas posturas necesarias para avanzar por estructuras 3D pueden resolverse mediante el problema CISP. También se analizará cómo escoger soluciones a dicho problema, considerando los límites de las coordenadas articulares como restricciones adicionales.

5. SIMULACIÓN Y EJEMPLOS

Esta sección presenta una herramienta desarrollada en Java que permite simular la cinemática directa del robot completo y verificar su capacidad de movimiento en una estructura 3D de ejemplo, así como validar los análisis cinemáticos de las secciones previas. La herramienta puede descargarse de <http://arvc.umh.es/parola/climber.jar> y requiere la última versión de Java.

El simulador, mostrado en la Figura 5, consta de tres ventanas. En la ventana gráfica se representa el robot sobre una estructura 3D de ejemplo. La ventana de control permite modificar el valor de cualquiera de las 10 coordenadas articulares mediante deslizaderas y campos numéricos. También permite reiniciar el simulador y cambiar el pie que está fijo a la estructura (el cual se muestra en color naranja en la ventana gráfica). Por simplicidad, el

simulador únicamente implementa la cinemática directa del robot, sin considerar su dinámica (no hay gravedad) ni las colisiones con el entorno o entre distintas partes del robot.

La ventana de salida muestra las matrices que codifican la pose de los sistemas de referencia E_A y E_B (solidarios a los pies del robot) con respecto al sistema de referencia del mundo W , fijado a una de las vigas de la estructura. Al modificar alguna coordenada articular, el programa resuelve la cinemática directa y calcula la pose del pie libre con respecto al sistema W de la siguiente forma:

$$\mathbf{T}_{E_k/W} = \mathbf{T}_{E_j/W} \mathbf{T}_{E_k/E_j} \quad (28)$$

donde la matriz \mathbf{T}_{E_k/E_j} está definida en la ecuación (16), j denota la pata fija, y k denota la pata libre ($j, k \in \{A, B\}$, $j \neq k$).

Según la Sección 3.2, la cinemática directa del robot completo tiene 256 soluciones debido a que cada mecanismo paralelo puede adoptar hasta cuatro configuraciones distintas. No obstante, seguidamente se mostrará que sólo una solución es válida en la práctica.

Para las simulaciones, se considera que los mecanismos paralelos poseen la siguiente geometría: $b = p = 4$ cm. Además, se considera que la longitud de los actuadores lineales debe estar entre un valor mínimo y un valor máximo, de forma que $r_{ij}, l_{ij} \in [19, 25]$ cm. Si se resuelve la cinemática directa del mecanismo paralelo en ese rango de coordenadas articulares, y se representa la coordenada y_{ij} de las soluciones frente a r_{ij} y l_{ij} , se obtienen las cuatro superficies mostradas en la Figura 6. Cada superficie está asociada a una de las cuatro configuraciones posibles del mecanismo, denotadas como sigue: H^+ , X^+ , H^- , y X^- . Las configuraciones H^+ y X^+ se indican en la Figura 6, mientras que las configuraciones H^- y X^- son simétricas a las primeras con respecto a la base del robot. Resulta evidente que, de acuerdo al diseño del robot (véase la Sección 2), las únicas soluciones válidas son las correspondientes a la configuración H^+ , ya que para las otras configuraciones se producen interferencias entre diferentes partes de las patas del robot. La Figura 6, además, proporciona un criterio para escoger la única solución válida: la solución H^+ siempre es la que tiene mayor coordenada y_{ij} .

Tras caracterizar la única solución válida de la cinemática directa, se simularán algunos movimientos básicos que permiten al robot avanzar por una estructura 3D. Para la geometría del robot se utilizará: $h = 16$ cm y $t = 15,6$ cm. Se asume que el robot comienza sobre la viga v_1 , en la posición mostrada en la Figura 7a, que es la configuración inicial en el simulador. Inicialmente, el

pie A está fijo y las coordenadas articulares valen: $\theta_A = \theta_B = 0$, $r_{ij} = l_{ij} = 21$ cm ($i \in \{1, 2\}$, $j \in \{A, B\}$). El objetivo es trepar a la columna c_1 .

En primer lugar, el robot debe aproximarse a la columna c_1 . Esta aproximación puede conseguirse mediante la secuencia de movimientos mostrada en la Figura 7, que consiste en: extender las patas para acercar el pie B a la columna (Figura 7b), fijar el pie B y liberar el pie A , y finalmente retraer las patas de nuevo (Figura 7c).

Nótese que las coordenadas articulares que proporcionan la postura de la Figura 7b pueden calcularse resolviendo el problema CISP, ya que los sistemas de referencia de los pies tienen sus ejes Z paralelos y sus planos XY coincidentes. Para ello, hay que resolver las ecuaciones (22) a (27), sustituyendo en ellas $j = A$, $\omega = \pi/2$ rad, $\mu = 23,4$ cm, así como los parámetros geométricos:

$$0 = \varphi_{1A} - \varphi_{2A} \quad (29)$$

$$23,4 = 7,8 + (y_{1A} + y_{2A} - 16)s_{\varphi_{2A}} \quad (30)$$

$$r_{1A} = \sqrt{(4 \cdot c_{\varphi_{1A}} - 4)^2 + (y_{1A} + 4 \cdot s_{\varphi_{1A}})^2} \quad (31)$$

$$l_{1A} = \sqrt{(4 \cdot c_{\varphi_{1A}} - 4)^2 + (y_{1A} - 4 \cdot s_{\varphi_{1A}})^2} \quad (32)$$

$$r_{2A} = \sqrt{(4 \cdot c_{\varphi_{2A}} - 4)^2 + (y_{2A} + 4 \cdot s_{\varphi_{2A}})^2} \quad (33)$$

$$l_{2A} = \sqrt{(4 \cdot c_{\varphi_{2A}} - 4)^2 + (y_{2A} - 4 \cdot s_{\varphi_{2A}})^2} \quad (34)$$

Dado que hay ocho incógnitas y seis ecuaciones, hay que resolver seis incógnitas en función de otros dos, que pueden ser (y_{1A}, y_{2A}) , por ejemplo. En tal caso, φ_{2A} se resuelve de la ecuación (30) en función de (y_{1A}, y_{2A}) . Seguidamente, φ_{1A} se calcula de la ecuación (29), quedando también en función de (y_{1A}, y_{2A}) . Sustituyendo φ_{1A} y φ_{2A} en las ecuaciones (31) a (34), se obtienen las coordenadas articulares en función de (y_{1A}, y_{2A}) . A continuación puede elegirse el valor de y_{1A} e y_{2A} de forma que las coordenadas articulares estén en $[19, 25]$ cm.

La elección puede realizarse fácilmente de forma gráfica. La Figura 8 muestra las curvas del plano (y_{1A}, y_{2A}) para las que el lado derecho de las ecuaciones (31) a (34) (que dependen únicamente de y_{1A} e y_{2A} tras sustituir φ_{1A} y φ_{2A}) es igual a 19 o 25. Dichas curvas encierran una región R donde todas las coordenadas articulares están entre 19 y 25 cm. Por tanto, cualquier punto de la región R sería una solución válida al problema CISP. Por ejemplo, tomando el punto $y_{1A} = y_{2A} = 22$ cm se obtienen las siguientes coordenadas articulares, que proporcionan la postura de la Figura 7b: $r_{1A} = r_{2A} \approx 24,238$ cm, $l_{1A} = l_{2A} \approx 19,783$ cm.

Tras aproximar el robot a la columna, se fija el pie A y se libera el pie B , que se apoya en la columna elevando la pata B (Figura 9). La postura de la

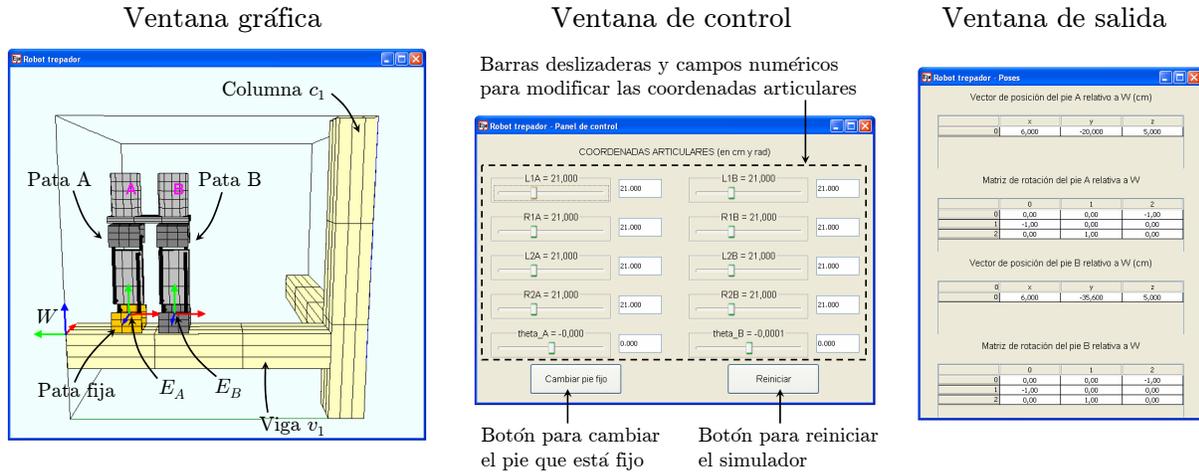


Figura 5: Herramienta para simular la cinemática directa del robot trepador.

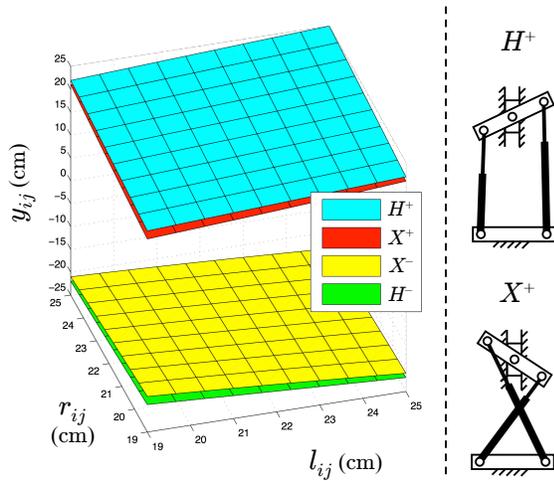


Figura 6: Superficies de soluciones a la cinemática directa del mecanismo paralelo para $b = p = 4$ cm. Las superficies H^+ y H^- son prácticamente paralelas a las superficies X^+ y X^- , respectivamente.

Figura 9 puede determinarse resolviendo el problema CISP, sustituyendo $j = A$, $\mu = 31,8$ cm y $\omega = \pi/4$ rad en las ecuaciones (22) a (27). Al igual que en el ejemplo anterior, se puede obtener la región R de puntos del plano (y_{1A}, y_{2A}) que permiten alcanzar la pose deseada cumpliendo los límites de las coordenadas articulares. Se puede comprobar que la solución $y_{1A} = y_{2A} = 22$ cm también es válida en este ejemplo, proporcionando las siguientes coordenadas articulares: $r_{1A} \approx 21,076$, $l_{1A} \approx 22,925$, $r_{2A} \approx 24,105$, $l_{2A} \approx 19,911$ (todas en cm), que resultan en la postura de la Figura 9.

6. CONCLUSIÓN

Este artículo ha presentado un nuevo robot híbrido serie-paralelo para explorar estructuras 3D. Se ha resuelto analíticamente la cinemática directa del robot completo, identificando la única solución válida. También se ha resuelto un caso particular de la cinemática inversa en el que el robot presenta movimientos planos y simétricos. Por último, se ha presentado una herramienta que permite simular la cinemática directa del robot, y se han mostrado algunos ejemplos numéricos de la resolución del problema cinemático inverso simplificado.

En el futuro se resolverá la cinemática inversa general del robot, y se estudiarán su espacio de trabajo y singularidades. También se realizará el modelado dinámico del mismo, y se abordará el problema de planificación de movimientos en estructuras complejas. Finalmente, se construirá un prototipo que se empleará en estructuras 3D reales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través de una ayuda FPU (Ref: FPU13/00413) y gracias al Ministerio de Economía y Competitividad a través del Proyecto DPI2013-41557-P.

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 appli-

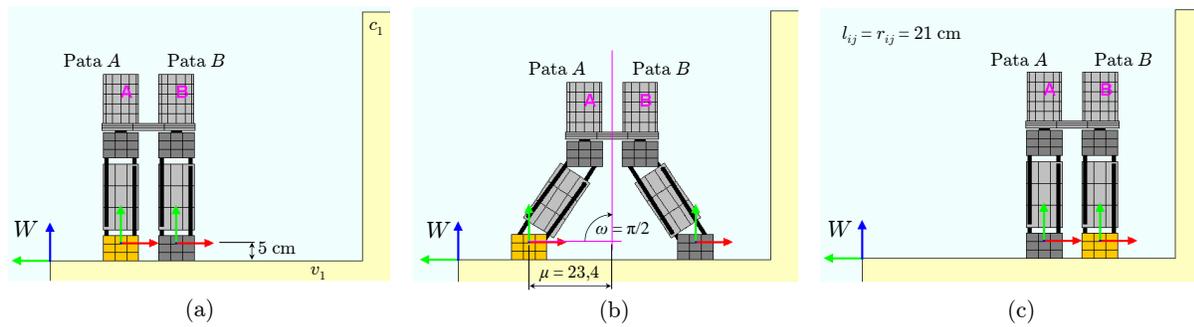


Figura 7: Avance a lo largo de una viga resolviendo el problema CISP.

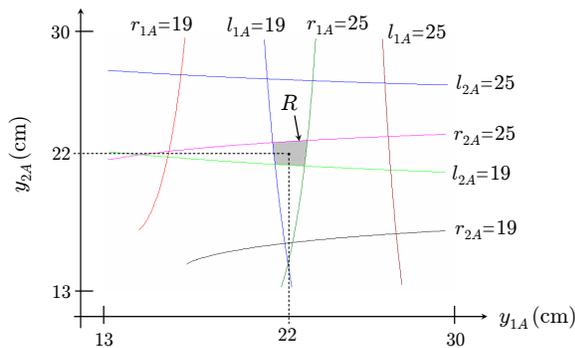


Figura 8: Soluciones factibles al problema CISP.

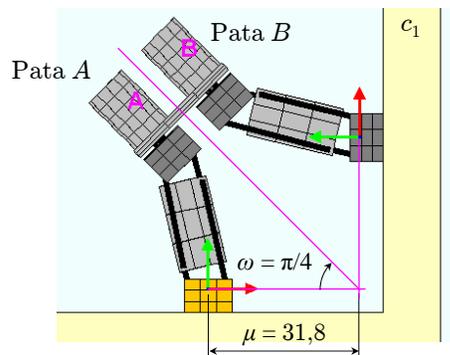


Figura 9: Transición cóncava entre dos planos.

cations 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 Ro-*

bots and Systems, pp. 1473–1478, September 2011.

[5] Kong X. and Gosselin C.M. Generation and Forward Displacement Analysis of RPR-PR-RPR Analytic Planar Parallel Manipulators. *ASME J. Mech. Design*, 124(2):294–300, 2002.

[6] Mampel J., Gerlach K., Schilling C., and Witte H. A modular robot climbing on pipe-like structures. In *Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, pp. 87–91, February 2009.

[7] Schmidt D. and Berns K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures - a survey of design aspects and technologies. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1288–1305, 2013.

[8] 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.

[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] Yoon Y. and Rus D. Shady3D: A Robot that Climbs 3D Trusses. In *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4071–4076, April 2007.

[12] Zhang H., Zhang J., Wang W., Liu R., and Zong G. A series of pneumatic glass-wall cleaning robots for high-rise buildings. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(2):150–160, 2007.