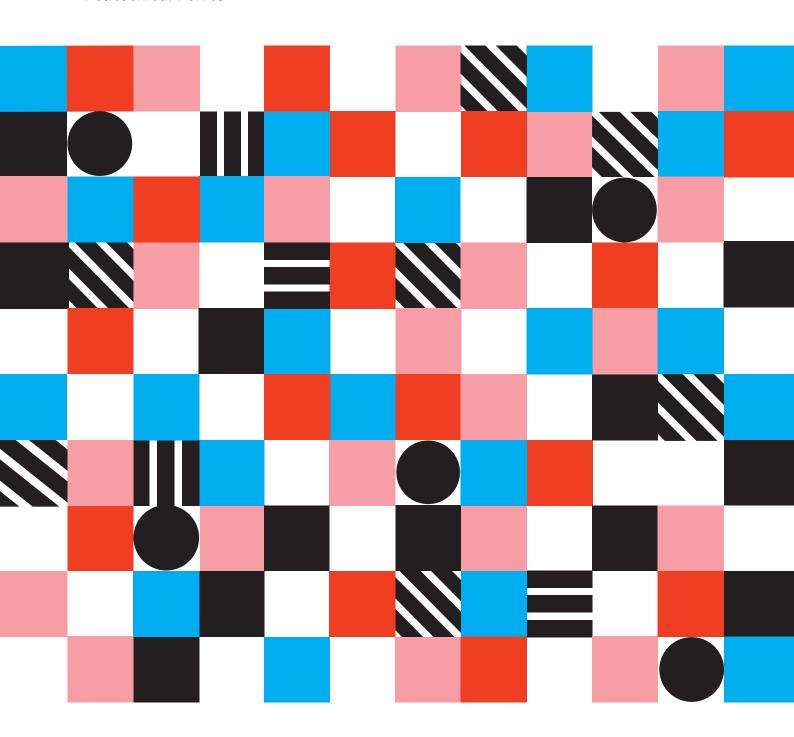
40.ª JORNADAS DE AUTOMÁTICA 4-6 SEP 2019



Universidade da Coruña Escuela Universitaria Politécnica. Ferrol





XL JORNADAS DE AUTOMÁTICA: LIBRO DE ACTAS

A Coruña, 2019 Universidade da Coruña Servizo de Publicacións

Ferrol, 4-6 de septiembre de 2019

XL Jornadas de Automática: libro de actas: Ferrol, 4-6 de septiembre de 2019

José Luis Calvo Rolle [et al.] (eds.)

A Coruña, 2019

Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións

N° de páginas: 899

 $210 \times 297 \text{mm}$

Índice: pp.xiii-xxvi

ISBN: 978-84-9749-716-9 Depósito Legal: C 761-2019

DOI: doi.org/10.17979/spudc.9788497497169

CDU: 681.5(063) IBIC: TJFM | TJF

ORGANIZAN:

Comité Español de Automática

Universidade da Coruña, Escola Universitaria Politécnica

COLABORA:

Universidade da Coruña, Vicerreitoría de Política Científica, Investigación e Transferencia

EDITORES:

José Luis Calvo Rolle
José Luis Casteleiro Roca
María Isabel Fernández Ibáñez
Óscar Fontenla Romero
Esteban Jove Pérez
Alberto José Leira Rejas
José Antonio López Vázquez
Vanesa Loureiro Vázquez
María Carmen Meizoso López
Francisco Javier Pérez Castelo
Andrés José Piñón Pazos
Héctor Quintián Pardo
Juan Manuel Rivas Rodríguez
Benigno Rodríguez Gómez

DISEÑO DE CUBIERTA:

Rafael Alejandro Vega Vega

Julia Núñez Calo

© de esta edición: Universidade da Coruña

© de los textos: los autores



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Automar

OPTIMIZACION HEURISTICA CON CRITERIOS DE ERROR DE CONTROL TMD EN TURBINAS MARINAS FLOTANTES	
ANÁLISIS Y PLANIFICACIÓN DE MISIONES DE BÚSQUEDA Y RESCATE EN EL ENTORNO MARÍTIMO	
REDUCCIÓN DE LA CARGA DE TRABAJO DEL OPERADOR EN UN CENTRO DE CONTROL ADAPTATIVO MULTI-VEHÍCULO	
MODELIZACIÓN, SIMULACIÓN Y EVALUACION ΓECNICO-ECONOMICA DE UNA TURBINA DE MAR	
EXPERIENCIAS EN EL DISEÑO DE ROBOTS EDUCACIONALES SUBMARINOS	
MODELO DINÁMICO Y CONTROL NO LINEAL PARA UN CONVERTIDOR DE ENERGÍA DE LAS CORRIENTES MARINAS DE PRIMERA GENERACIÓN Y DOS GRADOS DE LIBERTAD	
Bioingeniería	
DEEP LEARNING FOR THE AUTOMATIC CLASSIFICATION OF FISSUE TYPES IN BREAST BIOPSIES	

NUEVOS MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS INESPERADOS DURANTE LA MARCHA NORMAL A TRAVÉS DE SEÑALES EEG	
María Elvira, Eduardo Iáñez, Vicente Quiles, Mario Ortiz and Jose M. Azorín	
ARQUITECTURA PARA LA INTEGRACIÓN DE MOTORES DE VIDEOJUEGOS EN APLICACIONES BASADAS EN INTERFACES CEREBRO-COMPUTADOR	
Jose Estevez, Jonay Toledo and Leopoldo Acosta	
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE AGRUPAMIENTO A CORREDORES DE RESISTENCIA PARA LA ESTIMACIÓN DEL UMBRAL DE LACTATO	
Urtats Etxegarai, Eva Portillo Pérez, Jon Irazusta, Itziar Cabanes and Asier Zubizarreta	
EXOESQUELETO DE BAJO COSTE CONTROLADO POR SEÑALES EMG Y EEG ORIENTADO A TERAPIAS DE REHABILITACIÓN DE MANO	
Eduardo Iáñez	
DESARROLLO DE APLICACIONES MULTITAREA PARA EL ESTUDIO DE LA MEJORA DEL RENDIMIENTO COGNITIVO EN PACIENTES CON ENFERMEDADES NEURODEGENERATIVAS	
SISTEMA DE VISIÓN PARA EL GUIADO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO EN OPERACIONES DE CIRUGÍA ENDONASAL	
ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÁNGULO ANTEROPOSTERIOR DE UNA MULETA SENSORIZADA	
EVALUACIÓN DE UN ESQUEMA DE CONTROL MIOELÉCTRICO BIDIMENSIONAL PARA PRÓTESIS ROBÓTICAS	,

OBTENCIÓN NO INVASIVA DE LA ONDA DE PRESIÓN ARTERIAL EN LA CARÓTIDA113 David Zambrana, Vicente Esteve, Jose Maria Vicente and Jose Maria Sabater-Navarro
Computadores y Control
EL SEGMENTO DE TIERRA DEL SATÉLITE UPMSAT-2
PLANIFICACIÓN DESCENTRALIZADA BASADA EN SISTEMAS MULTIAGENTE PARA ORQUESTADORES EN LA NIEBLA
HACIA UNA PLATAFORMA GENÉRICA DE GESTIÓN DE APLICACIONES DINÁMICAMENTE RECONFIGURABLES
USING THE OPEN SOURCE LIBRARY LIBNODAVE FOR MONITORING TASKS IN THE SMART GRID SCENARIO141 Isaías González, Antonio José Calderón, José María Portalo and Manuel Calderón
HACIA LA PUESTA EN MARCHA VIRTUAL DE CÉLULAS ROBOTIZADAS BASADA EN GEMELO DIGITAL147 Darío Orive, Nagore Iriondo, Marga Marcos and Oskar Casquero
INTEGRACIÓN END-TO-END A TRAVÉS DEL MODELO DEL PRODUCTO 4.0
Control Inteligente
IDENTIFICACIÓN DE CARRETERAS CONVENCIONALES MEDIANTE TÉCNICAS DE SOFT COMPUTING

GENERACIÓN DE DATOS SINTÉTICOS CON OBJETOS DE COCINA	
PARA ENTRENAR REDES NEURONALES DE CONVOLUCIÓN 1' Luis Benages-Pardo, Rubén Sagüés-Tanco, Gonzalo López-Nicolás and Sergio Llorente	70
CENTRALIZED AND DISTRIBUTED MODEL-BASED PREDICTIVE CONTROL APPLIED TO A SEWER NETWORK	.78
ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN UNA ESTRUCTURA UTILIZANDO ECHO STATE NETWORKS	86
DETECTION SYSTEM OF FAILURE ALARMS IN THE MECHANICAL TRAIN OF A WIND TURBINE	.92
SISTEMA HÍBRIDO PARA LA PREDICCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE BASADA EN HIDRÓGENO, EMPLEADA EN EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	:00
COMPARACIÓN DE ALGORITMOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE POSTURAS DE LA MANO Y DEDOS	
Alberto Parra, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez	10
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS PARA ROBOTS AUTÓNOMOS BASADO EN LÓGICA BORROSA22 Daniel Vicente Rodrigo Muñoz and Matilde Santos	226
MONITORIZACIÓN DEL ESTADO DE RODAMIENTOS BASADA EN TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO	34

Educación en Automática

DESPLIEGUE AUTOMÁTICO DE LABORATORIOS REMOTOS EXTENDIENDO LAS CAPACIDADES DE DE EJSS	2
Iñigo Aizpuru-Rueda, Eva Besada-Portas, Jesús Chacón and José Antonio López-Orozco	
RENEWABLE ENERGY SYSTEMS AND SMART GRIDS: PLATFORM FOR DEVELOP FINAL YEAR PROJECTS ON AUTOMATION AND SUPERVISION)
EDUCACIÓN EN SOSTENIBILIDAD Y PROMOCIÓN DE VOCACIONES CIENTÍFICO-TÉCNICAS EN ESTUDIANTES PREUNIVERSITARIOS A TRAVÉS DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO SOLAR	7
MEJORA DE SISTEMA DE CONTROL COORDINADO DE ROBOTS MÓVILES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE LOCALIZACIÓN POR VISIÓN	3
LABORATORIO DE MANUTENCIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL RICARDO MARÍN DE LA UNIVERSIDAD DE VIGO: 25 AÑOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL)
REMOTE RESEARCH LABORATORY DEVELOPMENT BY USING MULTICONNECTED INDUSTRIAL TECHNOLOGIES	7
DUINO-BASED LEARNING (DBL) : UN PROYECTO PARA FACILITAR EL USO DE ARDUINO Y MATLAB288 Eneko Lerma, Robert Griñó, Ramon Costa Castelló and Carlos Sanchis	3
LAS VENTAJAS DEL IoT EN EL DISEÑO DE LABORATORIOS REMOTOS: myGATEWAY	1

APRENDIZAJE DE SENSORIZADO DE ENTORNOS IoT MEDIANTE BEAGLEBONE
Alejandro Millan Del Rio, Jose Alberto Benitez Andrades, Carmen Benavides Cuellar, Bruno Fernandes, Fabio Silva, Jose Luis Casteleiro Roca, Isaias Garcia Rodriguez and Hector Alaiz Moreton
RECONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN EQUIPO DE LABORATORIO CLASIFICADOR DE PIEZAS POR PESO309 Eduardo Moya, Alfonso Poncela, Javier García and Mario Blázquez
PLATAFORMA GIROSCÓPICA REALIZADA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA EL CONTROL DE ACTITUD Y ORIENTACIÓN DE UAVS MULTI-ROTOR
EXPERIENCIA DE APRENDIZAJE BASADO EN PROYECTOS CON EVALUACIÓN COMPETITIVA-COLABORATIVA PARA REGULACIÓN AUTOMÁTICA
EQUIPO DE PRÁCTICAS PORTÁTIL PARA APRENDIZAJE SOBRE MANEJO Y PROGRAMACIÓN DE AUTÓMATAS PROGRAMABLES 33: Alfonso Poncela Mendez and Jesus Aguado Laguna
CONTROL ACTIVO DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS CIVILES ESBELTAS
USO DEL ESTÁNDAR LTI PARA INTEGRAR SISTEMAS DE GESTIÓN DE APRENDIZAJE Y LABORATORIOS ONLINE
DESAROLLO DE LABORATORIOS HÍBRIDOS DE SISTEMAS INDUSTRIALES PARA EL APRENDIZAJE INTERACTIVO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL
EJEMPLO DE INTEGRACIÓN DE ALEXA CON UN ROBOT UR 360 Jose Maria Vicente-Samper, Irene Campos, Benjamin Sanz Worrell, Adrian Rodriguez, Juna Miguel Onate Tevar and Jose Maria Sabater-Navarro

Ingeniería de Control

SISTEMA DE CONTROL BASADO EN ARDUINO PARA UNA CALDERA DE BIOMASA
Martín Balboa, Serafin Alonso, Juan Jose Fuertes, Antonio Moran and Miguel Angel Prada
GESTIÓN ENERGÉTICA DE UN CICLO DE REFRIGERACIÓN CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
Guillermo Bejarano, João M. Lemos, Manuel G. Ortega and Francisco R. Rubio
OBSERVADOR DE ALTA GANANCIA CON ZONA MUERTA PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM
Andreu Cecilia and Ramon Costa Castelló
NUEVAS TECNOLOGÍAS EN MANIPULADORES INGRÁVIDOS: MANIPULADOR INGRÁVIDO 4.0 (MINIon 4.0)
CONTROL ROBUSTO QFT DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN 39' Rocío Del Campo Pedrosa, Montserrat Gil-Martínez and Javier Rico-Azagra
DISEÑO DE UNA MAQUETA DE BAJO COSTE PARA SHM
CONTROL PREDICTIVO LINEAL DEL PH EN UN FOTOBIORREACTOR RACEWAY414
Ángeles Hoyo, José Luis Guzmán, José Carlos Moreno and Manuel Berenguel
CONTROL DE UN RECUPERADOR DE SALES EN UNA PLANTA TERMOSOLAR HÍBRIDA
Pablo Otálora, Jose Luis Guzman, Lidia Roca and Javier Bonilla
COMPARATIVA DE ENTORNOS OPEN-SOURCE PARA SISTEMAS DE SUPERVISIÓN APLICABLES A SMART GRIDS/SMART
MICRO-GRIDS

ESTIMACIÓN DISTRIBUIDA DE SISTEMAS LTI BASADA EN CONFIANZA
Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela and Pablo Millan
UNA REGLA DE SINTONÍA NO ESTÁNDAR PARA CONTROLADORES PI POR EVENTOS
BANCO DE ENSAYO PARA MOTORES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS 450
Jose Luis Torres-Moreno, Galo Heredia, Antonio Gimenez-Fernandez and Antonio Visioli
Modelado, Simulación y Optimización
CREACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO PARA LA GESTIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS HVAC EN EDIFICIOS BASADOS EN TRNSYS
Adrian Cardona Ruiz, Daniel Limon Marruedo, Juan Francisco Coronel Toro and Luis Perez-Lombard
MODELOS EMPÍRICOS DEL CAMPO SOLAR EN PLANTAS TERMOSOLARES DE CONCENTRACIÓN. APLICACIÓN A LA PLANIFICACIÓN
Emilian Gelu Cojocaru, José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo and Manuel Emilio Gegundez-Arias
MODELO DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE EDIFICIOS ORIENTADO AL CONTROL Y GESTIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA
Joaquin Garcia Ordonez, Juan Moreno Nadales, Daniel Limon Marruedo, Luis Perez-Lombard Martin de Oliva, Juan Francisco Coronel Toro and Adrian Cardona Ruiz
AJUSTE DE UN MODELO DE REDES DE CONTAGIO DE VARICELA MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICOS EN UN ENTORNO DE CÁLCULO DISTRIBUIDO

MODELLING A SOLAR TRACKER WITH HIGH CONCENTRATION PANELS
Manuel Garrido Satue, Fernando Castaño Castaño, Manuel Gil Ortega Linares and Francisco Rodriguez Rubio
DISEÑO DE UN GEMELO DIGITAL PARA EL GESTOR DE OPERACIONES DE UNA LAVANDERÍA INDUSTRIAL
José Luis Calvo Rolle and Juan Albino Méndez Pérez
INTERFAZ PARA UN OPTIMIZADOR QUE GESTIONA LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN UNA FÁBRICA AZUCARERA . 500 Sergio Hernández, Cristian Pablos and Felipe Acebes
REAL-TIME OPTIMISATION FOR A HEAT-RECOVERY SECTION WITH EQUIPMENT DEGRADATION
FRAMEWORK FOR MOTION PREDICTION OF VEHICLES IN A SIMULATION ENVIRONMENT
ESTUDIO DEL MODELO DE COMBATE DE LANCHESTER COMO SOPORTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN DECISOR ESTRATÉGICO OPERACIONAL MILITAR MEDIANTE BLOQUES RETROALIMENTADOS
Gerardo Minguela Castro, Carlos Cerrada and Jose Antonio Cerrada DETECCIÓN Y SUPRESIÓN DE ARMÓNICOS DE BAJO ORDEN EN
LA CORRIENTE ELÉCTRICA
DISEÑO EN SOLIDWORKS DE PLATAFORMA DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA
MEJORAS DEL SIMULADOR DE DISPERSIÓN DE GASES GADEN PARA DESARROLLOS DE ROBÓTICA OLFATIVA
SCHEDULING ÓPTIMO DE PROCESOS BATCH DE DURACIÓN INTERDEPENDIENTE

DETECCIÓN DE FALLOS EN REDES DE PRESIÓN PERTENECIENTES A REDES DE SUMINISTRO DE AGUA MEDIANTE FILTROS ESTÁTICOS LINEALES BASADOS EN PCA 568 Mario Pereira Martin, Joaquim Blesa, Vicenç Puig and David Muñoz De
la Peña Sequedo
MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE MISIONES DE BÚSQUEDA MEDIANTE UAVs574
Sara Pérez-Carabaza, Eva Besada-Portas, José Antonio López-Orozco and Gemma Blasco
MODELO DE TEMPERATURA PARA REACTORES ABIERTOS DE MICROALGAS
Enrique Rodríguez Miranda, Francisco Gabriel Acién Fernández, José Luis Guzmán Sánchez, Manuel Berenguel Soria and Antonio Visioli
COMPARACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA SISTEMAS MPPT: OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA ENTREGADA A LA CARGA VS OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA EXTRAÍDA DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO
Juan Ríos Gutiérrez, Juan Manuel Enrique Gómez, Antonio Javier Barragan Piña and José Manuel Andújar
LOW LEVEL CONTROL ACTUATED SYSTEM MODELLING APPROACH FOR HIGHLY AUTOMATED VEHICLES
Joseba Sarabia, Jose Angel Matute-Peaspan and Asier Zubizarreta
DESIGN AND DEVELOPMENT OF A LOW COST AUTOMATIC STRINGED INSTRUMENT TUNER
Javier Sevilla Salcedo, Diego Manuel Martínez Gila, Ildefonso Ruano Ruano, Alejandro Sánchez García, Elísabet Estévez Estévez, Juan Gómez Ortega and Javier Gámez García
INFLUENCIA DE LA LATENCIA EN EL CONTROL DE AGVS A
TRAVÉS DE REDES 5G
Jesus Enrique Sierra Garcia and Matilde Santos Peñas
MODELADO Y VERIFICACIÓN MEDIANTE LÓGICA LINEAL TEMPORAL DE UN GRUPO DE DOS ASCENSORES CON SISTEMA DE CONTROL DE DESTINO
Manuel Toscano-Moreno, Alberto Arregui, Anthony Mandow and Alfonso García-Cerezo

AN OPERATIONAL MODEL FOR THE OPTIMAL OPERATION OF THE FREEZE-DRYING PROCESS
Carlos Vilas, Antonio Alonso, Eva Balsa-Canto, Estefanía López-Quiroga and Cristian Trelea
ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD E IDENTIFICABILIDAD ESTRUCTURAL DE MODELOS NO LINEALES: APLICACIÓN A LA VÍA DE SEÑALIZACIÓN JAK/STAT
RED NEURONAL ESTRUCTURADA EN EL ESPACIO DE ESTADOS COMO MODELO DE CAJA GRIS
Robótica
DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ROBOT AÉREO PARA LA INSPECCIÓN DE COLECTORES DE SANEAMIENTO
CONTROL DE FORMACIONES SOBRE REGIONES OBJETIVO DE SISTEMAS MULTI-AGENTE LAGRANGIANOS CON RETARDO
COLECCIÓN DE JUPYTER NOTEBOOKS PARA CURSOS DE ROBÓTICA MÓVIL
DESIGN OF A NOVEL VARIABLE-STIFFNESS GRIPPER USING JAMMING FINGERS
Daniel Cardin-Catalan, Angel P. Del Pobil and Antonio Morales EXPERIENCIAS EDUCATIVAS BASADAS EN EL SISTEMA MARPABIOBOT
Gustavo Casañ, Jose Vicente Martí, Raul Marín, David Fornás and Pedro Sanz

USO DE TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING PARA REALIZAR MAPPING EN ROBÓTICA MÓVIL
Sergio Cebollada, Vicente Román, Luis Payá, María Flores, Luis Miguel Jiménez and Oscar Reinoso
TELEOPERATING A MOBILE MANIPULATOR USING A UAV CAMERA WITHOUT ROBOT SELF-OCCLUSIONS
ALGORITMO DE GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS EN EL INTERIOR DE CHAPAS PARA LA SUBSANACIÓN DE DEFECTOS 702 Álvaro Fernández García, Sara Roos Hoefgeest Toribio, Ignacio Álvarez García and Rafael Corsino González de Los Reyes
EVALUACION MULTI-ZMP PARA TAREAS DE TRANSPORTE DE OBJETOS EN ROBOTS HUMANOIDES
DESARROLLO DE UNA VERSIÓN DE BAJO COSTE DEL ROBOT SOCIAL MINI
OBTENCION DEL MODELO CINEMATICO INVERSO DE SISTEMAS ROBOTIZADOS DE CADENA CINEMATICA ABIERTA EMPLEANDO BASES DE GROEBNER. APLICACION A UN ROBOT HEXAPODO726 Jose Guzman-Gimenez, Ángel Valera, Vicente Mata and Miguel Ángel Díaz-Rodríguez
UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA BASADA EN HARDWARE Y SOFTWARE ABIERTO PARA COLABORACIÓN CON APLICACIONES DE ROBÓTICA A MISIONES DE BÚSQUEDA Y RESCATE
MÉTODO DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS MÚLTIPLES PARA ENJAMBRE DE UAVS

HERRAMIENTA PARA VISUALIZACIÓN GRÁFICA DE FUERZAS DE CONTACTO Y DE MOVIMIENTOS DE UNA MANO ROBÓTICA CON SENSORES TÁCTILES
Andrés Montaño and Raúl Suárez
HACIA UNA ESTRATEGIA ASISTIDA POR ROBOT PARA LA RECUPERACION DE FUNCION MOTORA DE EXTREMIDAD SUPERIOR CON ASPECTOS COGNITIVOS
Edwin Daniel Oña, Bartek Łukawski, Alberto Jardón and Carlos Balaguer
PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE UN ROBOT MÓVIL MODULAR CON UN ÚNICO ACTUADOR764
Adrián Peidró Vidal, Julio Gallego, Luis Paya, José María Marín and Oscar Reinoso
DETECCIÓN DE PALLETS MEDIANTE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADOR772
David Ramos and Jesus Enrique Sierra Garcia
CONTROL DINÁMICO DE MANIPULADORES MÓVILES CON REALIMENTACIÓN VISUAL
Jose L. Ramón, Álvaro Belmonte, Jorge Pomares, Gabriel J. García, Carlos A. Jara, Andrés Úbeda, Ester Abad and María Ángeles Rueda
INTEGRACIÓN DE UN PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS PARAMETRIZADO EN LA ARQUITECTURA ROBÓTICA ROS787
Mario A. Rueda-Castro, Javier Monroy, Francisco-Angel Moreno and Javier Gonzalez-Jimenez
DISEÑO DE UNA PINZA SUBACTUADA HÍBRIDA SOFT-RIGID CON SENSORES HÁPTICOS PARA INTERACCIÓN FÍSICA ROBOT-HUMANO
Trinidad Sánchez-Montoya, Juan M. Gandarias, Francisco Pastor, Antonio J. Muñoz-Ramírez, Alfonso J. García-Cerezo and Jesús M. Gómez-de-Gabriel
GENERACIÓN EFICIENTE DE MOSAICOS PARA INSPECCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS LINEALES MEDIANTE ROBOTS AÉREOS 802
Raúl Tapia, José Ramiro Martínez de Dios and Aníbal Ollero

ASISTENCIA AL APARCAMIENTO BASADO EN UNA CÁMARA DE
ΓΙΕΜΡΟ DE VUELO
Visión por Computador
DENTIFICACIÓN Y CONTEO DE ACEITUNAS EN IMÁGENES DIGITALES TOMADAS EN EL OLIVAR MEDIANTE MORFOLOGÍA MATEMÁTICA Y REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES818 Arturo Aquino, Juan Manuel Ponce, Borja Millán, Diego Tejada-Guzmán and José Manuel Andújar
ENHANCING TEXT RECOGNITION ON TOR DARKNET IMAGES828 Pablo Blanco-Medina, Enrique Alegre, Mhd Wesam Al-Nabki, Deisy Chaves and Eduardo Fidalgo Fernandez
PARALLEL COMPUTING TECHNOLOGIES IN VIDEO STABILIZATION FOR TEACHING PURPOSES
EVALUACIÓN DE NUEVOS MODOS DE EMPLEO DE LOS DESCRIPTORES DE APARIENCIA GLOBAL EN TAREAS DE LOCALIZACIÓN
LOCALIZACIÓN DE ROBOTS MÓVILES EN ENTORNOS INDUSTRIALES USANDO UN ANILLO DE CÁMARAS
ES POSIBLE ENTRENAR MODELOS DE APRENDIZAJE PROFUNDO CON DATOS SINTÉTICOS?859 Noelia Vallez, Alberto Velasco-Mata, Juan José Corroto and Oscar Deniz

PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE UN ROBOT MÓVIL MODULAR CON UN ÚNICO ACTUADOR

Adrián Peidró, Julio Gallego, Luis Payá, José María Marín, Óscar Reinoso Laboratorio de Automatización, Robótica y Visión por Computador, Univ. Miguel Hernández, 03202 Elche apeidro@umh.es, julio.gallego@alu.umh.es, lpaya@umh.es, jmarin@umh.es, o.reinoso@umh.es

Resumen

Este artículo presenta un robot móvil modular que, con un único actuador, es capaz de controlar su posición y orientación a lo largo de un plano. Para ello, el cuerpo del robot consta de un conjunto de unidades de adhesión que puede fijar al entorno, de manera que su único motor hace pivotar al robot alrededor de la unidad de adhesión que se fije al entorno. Fijando de manera alterna unas u otras unidades de adhesión, el robot es capaz de moverse libremente por un plano, e incluso es capaz de realizar transiciones cóncavas entre planos perpendiculares o de combinarse con otros módulos idénticos para formar robots reconfigurables más complejos. En este artículo resolvemos el problema de planificación de trayectorias planas del robot propuesto, asumiendo que las trayectorias son poligonales e incluyen tramos estrechos difíciles de atravesar.

Palabras clave: robots con un único actuador, planificación de trayectorias, robots trepadores, robots modulares, pivote alternante, unidades de adhesión

1 INTRODUCCIÓN

Los Robots Móviles con un Único Actuador (RMUA) tienen la capacidad de explorar entornos con gran libertad de movimiento usando un único motor. Las ventajas de usar un único motor son menor coste, consumo energético, tamaño y peso. Gracias a estas ventajas, los RMUA tienen aplicaciones en tareas que requieran autonomía energética, miniaturización y navegación en áreas de dificil acceso, con fines de inspección, limpieza, rescate, o reconocimiento [12].

Como ilustra la Figura 1, la mayoría de RMUA encontrados en la literatura pueden clasificarse en tres tipos, en función de dos criterios: la dimensión de su espacio de trabajo, y la existencia de mecanismos binarios auxiliares que permiten al robot cambiar la dirección o tipología de su movimiento.

Los RMUA de tipo 1 se mueven por espacios de trabajo unidimensionales usando un único actuador, sin mecanismos auxiliares. En [11] se presenta un octópodo que puede avanzar hacia delante o atrás en

línea recta usando un solo motor y un sistema de levas que coordina a sus ocho patas. De forma similar, en [3] y [1] se presentan sendos robots trepadores capaces de escalar verticalmente usando un único motor. En [13] se propone un robot capaz de avanzar en línea recta o escalar usando un movimiento ondulatorio generado por un único motor.

Los RMUA de tipo 2 pueden explorar espacios de trabajo con dimensión mayor a uno. Además de tener un actuador continuo principal, los RMUA de tipo 2 también disponen de mecanismos auxiliares binarios o todo-nada (embragues, imanes...) que les permiten modificar el efecto que su único actuador continuo ejerce sobre el movimiento global del robot, canalizando la energía motriz de una u otra forma para convertirla en avance en línea recta, salto, giro, etc. En esta línea, en [10] se presenta un robot móvil con dos ruedas de radio variable, actuadas por un único motor. Al activar cierto embrague, dicho motor también desplaza el centro de gravedad del robot, modificando el radio de las ruedas y generando un cambio en la dirección de avance. En [2] se propone un robot serpentino con un único actuador de tipo tendón. Aplicando selectivamente corrientes eléctricas a algunos de los segmentos que forman a este robot, es posible derretir temporalmente las uniones soldadas que los conectan, para modificar su geometría y lograr que el robot avance en línea recta o gire. En [6] se presenta un robot inspirado en cucarachas, con un único motor que le hace avanzar en línea recta o girar al modificar la rigidez de sus patas mediante aleaciones con memoria de forma.

Los RMUA de tipo 3 suelen ser robots subactuados con un único actuador y sin mecanismos auxiliares binarios, y pueden controlar su movimiento en espacios de trabajo con dimensión mayor a uno. Que estos robots realicen un movimiento u otro (avance recto, giro, salto...) depende de las características de la señal de control aplicada a su único actuador (su amplitud, signo, frecuencia...). En [9] se presenta un robot capaz de nadar en línea recta o virar al excitar su único motor a frecuencia constante o variable, respectivamente. En [4] se propone un robot con un único actuador piezoeléctrico que le hace avanzar en línea recta o girar según se excite a una u otra de

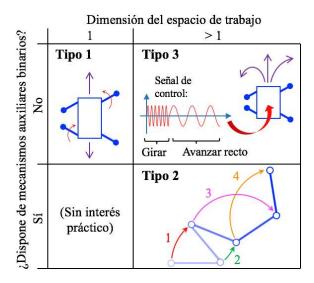


Figura 1: Clasificación de RMUA

sus frecuencias naturales. En [12] se presenta un hexápodo con patas de diferente rigidez, capaz de avanzar recto o girar en función de la forma del perfil de velocidades que se introduzca a su único motor. En [5] se propone una rueda robótica movida por un solo motor que le hace rodar en línea recta al oscilar entre dos posiciones límite, o bien le hace saltar al liberar la energía elástica de cierto muelle que se comprime al superar una de dichas posiciones límite. Finalmente, [14] presenta un robot saltador que puede realizar tres tipos de movimiento en función de la amplitud y el signo del giro de su único motor: saltar, levantarse tras el salto, y reorientarse para el siguiente salto.

Comparando los tres tipos de RMUA, se observa que los de tipo 1 son los más simples, pero únicamente pueden moverse en una dimensión. Por otro lado, los de tipo 3 pueden controlar su movimiento en espacios de trabajo de mayor dimensión, pero dicho control no es sencillo pues depende en gran medida de su dinámica subactuada [12]. En un término medio se encuentran los robots RMUA de tipo 2, que pueden controlar fácilmente su movimiento en espacios de trabajo de dimensión mayor a uno, a costa de incorporar mecanismos binarios auxiliares. Por este motivo, en este artículo se presenta el robot MASAR (véase la sección 2), que es un nuevo RMUA de tipo 2 capaz de moverse por planos usando un único motor y varias unidades de adhesión que pueden fijarse al entorno para modificar el punto alrededor del cual pivota el robot. En la sección 3 se resuelve el problema de planificación de trayectorias, para lograr que este robot siga trayectorias poligonales con estrecheces que coartan la amplitud de sus movimientos. La sección 4 ilustra el problema resuelto mediante experimentos, mientras que la sección 5 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2 MASAR: UN ROBOT MODULAR CON UN ÚNICO ACTUADOR

Esta sección presenta el robot MASAR (de su acrónimo en inglés: "Modular And Single-Actuator Robot"), que es un RMUA de tipo 2. Este robot, mostrado en la Figura 2, ha sido patentado por los autores (nº ES2684377, fecha prioridad: 2017-03-31).

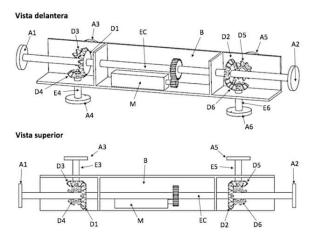


Figura 2: Robot MASAR, un RMUA de tipo 2

MASAR tiene un cuerpo B unido a un motor M, que hace girar a un eje central EC. A cada lado del motor M hay un juego de tres engranajes cónicos, de ejes concurrentes y perpendiculares (engranajes D1, D3, D4 a la izquierda de M, y D2, D5, D6 a su derecha). Cada engranaje cónico "Di" es solidario a una unidad de adhesión "Ai". Cada unidad de adhesión "Ai" puede estar pegada o despegada del plano con el que hace contacto. Cuando solo una unidad de adhesión está pegada al entorno, al accionar el motor M se produce la rotación de todo el robot alrededor de dicha unidad. Por ejemplo, al fijar A4 al entorno y accionar M, el engranaje D1 rota sobre el engranaje D4, que está fijo (por estarlo A4), lo cual provoca la rotación de todo el robot alrededor de A4. Posteriormente, puede fijarse A6 y liberarse A4, con lo que el robot rotará alrededor de A6 de forma similar a como rotaba alrededor de A4. Repitiendo esta secuencia, en la que se fijan y liberan las unidades de adhesión de manera alterna, puede variarse el punto alrededor del que pivota el robot y producir así su avance por el plano, como ilustra la Figura 3.

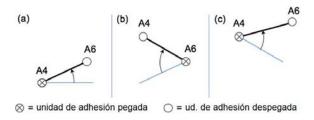


Figura 3: Locomoción del robot MASAR

En [7] se presenta un robot similar al MASAR, que también emplea una secuencia de "pivote alternante" como la mostrada en la Figura 3 para avanzar por el plano utilizando un único actuador. No obstante, mientras que el robot presentado en [7] utiliza un mecanismo interno de correas, MASAR usa los juegos de engranajes cónicos mostrados en la Figura 2, y además ofrece más posibilidades de movimiento:

- Gracias a sus unidades de adhesión orientadas hacia planos perpendiculares, MASAR puede realizar transiciones cóncavas entre planos perpendiculares, lo cual le permite moverse entre el suelo, el techo, y paredes, como ilustra la Figura 4. Esto hace interesante al robot MASAR para explorar recintos de interior.
- Diversos módulos idénticos MASAR pueden colaborar y combinarse entre sí uniendo sus unidades de adhesión, formando robots modulares articulados que puedan desempeñar tareas complejas que un único módulo no podría. Por ejemplo, la Figura 5 ilustra cómo cuatro módulos MASAR podrían formar un brazo articulado de tipo serie para subir a una mesa. Un solo módulo no podría subir porque habría de realizar una transición convexa desde la pata de la mesa hacia su parte superior (y un módulo solo puede realizar transiciones cóncavas, como el paso desde el suelo a la pata de la mesa).

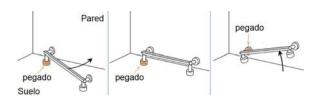


Figura 4: robot MASAR cambiando de plano

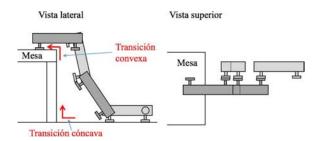


Figura 5: cuatro módulos MASAR colaborando para subir a una mesa

3 PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS

Esta sección aborda el problema de planificación de trayectorias planas del robot propuesto, asumiendo que la trayectoria a seguir es poligonal, estando formada por una secuencia de segmentos obtenidos de, por ejemplo, un algoritmo A*. Se considerarán los siguientes sub-problemas:

- Cómo lograr que el robot siga una trayectoria poligonal sin obstáculos que restrinjan el movimiento del robot, es decir, no existe restricción en la amplitud de las rotaciones que puede realizar el robot.
- 2. Cómo lograr que el robot atraviese una sección estrecha, con estrecheces que restringen la amplitud de sus rotaciones.
- Combinación de los dos problemas anteriores: seguir una trayectoria poligonal que pueda contener tramos con estrecheces.

Estos tres problemas serán resueltos geométricamente en las siguientes secciones.

3.1 SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS POLIGONALES

La primera decisión a tomar es el tipo de locomoción que debe usar el robot para desplazarse a lo largo de trayectorias rectas sin restricciones u obstáculos que limiten la amplitud de sus movimientos. En ese caso, la locomoción más razonable es realizar giros de 180°, dado que éstos maximizan la distancia recorrida en un solo giro. Esto se ha ilustrado en la Figura 7.

Asumimos que, al inicio del trayecto poligonal, el robot comienza con una orientación cualquiera, y con su punto medio situado sobre el primer segmento del camino. Si este no fuera el caso, bastaría con rotar el robot alrededor de cualquiera de sus pivotes, hasta que su punto medio intersecara con el segmento.

Para comenzar el viaje a lo largo de la secuencia de segmentos mediante giros de 180°, el robot debe estar completamente alineado con el segmento inicial. Si ninguno de sus dos pivotes se encontrara inicialmente sobre la recta, serían necesarios dos giros para lograr la pose inicial deseada, como se explica seguidamente.

3.1.1 Reorientación Inicial

Como se ha mencionado anteriormente, inicialmente podría ocurrir que ambos pivotes no se encontraran sobre la recta a recorrer, el robot deberá entonces reorientarse para alinearse con la recta. Serán necesarios dos giros, como se ilustra en la Figura 6.

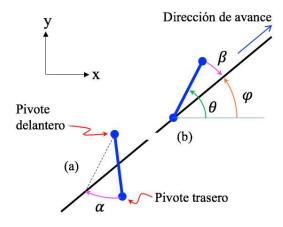


Figura 6: Reorientación inicial para alinear el robot con el primer segmento de la trayectoria poligonal

El primer giro, ilustrado en la Figura 6a, requiere buscar un punto sobre la recta cuya distancia al pivote delantero sea igual a la longitud del robot. Este punto se encuentra resolviendo la intersección entre la recta y una circunferencia centrada en el pivote delantero y con radio igual a la longitud del robot. Una vez encontrado tal punto de intersección, calculamos el valor de la rotación α que sitúa al pivote trasero sobre la recta. Considerando la recta como un vector apuntando hacia el punto al que debe moverse el robot, si el pivote de giro está situado a la derecha de este vector, el ángulo calculado será positivo (sentido antihorario). En caso contrario, será negativo (sentido horario), como en la Figura 6a.

La reorientación final, mostrada en la Figura 6b, parte de la situación previa, y será ejecutada tomando como pivote de giro el trasero, el cual ya se encuentra sobre el segmento. El ángulo a rotar el robot en este caso es $\beta = \theta - \varphi$, donde θ y φ son, respectivamente, la orientación absoluta (es decir, con respecto al eje x) del robot y de la recta. Ambos ángulos pueden calcularse mediante la función atan2.

3.1.2 Movimiento Rectilíneo con Cambio de Dirección

Cuando el robot está completamente sobre la línea, el movimiento a lo largo de ésta puede comenzar, realizándose mediante giros de 180°, alternando el pivote y el signo del ángulo de rotación:

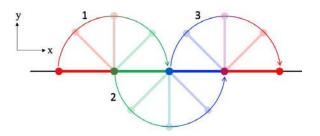


Figura 7: Locomoción mediante giros de 180º

Tras realizar un número determinado de rotaciones, la distancia entre el pivote delantero y el final de la recta estará por debajo de cierto umbral prefijado. En ese momento, el robot habrá de detener su avance e iniciará una secuencia de maniobras para cambiar al siguiente segmento de la trayectoria:

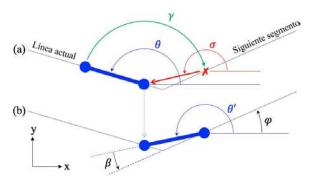


Figura 8: Cambio de dirección y reorientación

La primera maniobra consigue situar el pivote trasero en el siguiente segmento (Figura 8a). Esto se logra buscando un punto "x" del siguiente segmento cuya distancia hasta el pivote delantero sea igual a la longitud del robot. De nuevo, esto consiste en resolver la intersección entre una recta y una circunferencia centrada en el pivote delantero y con radio igual a la longitud del robot, como en la Figura 6a.

Una vez encontrado el punto de intersección "x", se define un vector desde éste hasta el pivote delantero del robot: σ denota el ángulo que dicho vector forma con el eje x. Además, también calculamos el ángulo θ que forma el robot con el eje horizontal. Con ello, el ángulo γ que sitúa al pivote trasero sobre en punto de intersección será:

$$\gamma = \sigma - \pi - \theta \tag{1}$$

Finalmente, para situar el robot completamente sobre la nueva línea, habrá que rotar el robot un ángulo β alrededor de su pivote delantero (véase la Figura 8b):

$$\beta = \pi - (\theta' - \varphi) \tag{2}$$

siendo θ' el nuevo ángulo entre el robot y el eje x, y siendo φ el ángulo entre la nueva línea y el eje x. Tras completar el cambio de dirección, el robot continuará a lo largo de la nueva línea usando la locomoción descrita anteriormente: ejecutando giros de 180° hasta alcanzar el final de esta nueva línea, después cambiará de nuevo la dirección de movimiento, etc.,... así hasta que el final de todo el camino poligonal sea alcanzado.

3.2 ATRAVESANDO TRAMOS ESTRECHOS

Esta sección se centra en la resolución de aquellas situaciones donde el robot ha de atravesar un tramo

estrecho delimitado por dos paredes cercanas (véase la Figura 9). En tal caso, el movimiento definido en la sección 3.1 no es apropiado, ya que dentro de la estrechez no hay espacio suficiente para realizar las amplias rotaciones de 180°.

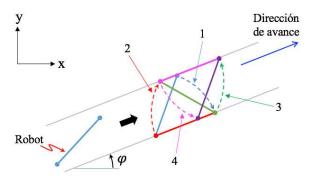


Figura 9: Atravesando un tramo estrecho

Para resolver la locomoción en estrecheces, asumiremos que éstas ocurren en un tramo horizontal. Si el robot encontrara una estrechez en un tramo oblicuo que forma un ángulo φ con la horizontal (como en la figura anterior), entonces bastaría con rotar el problema un ángulo $-\varphi$, resolverlo según se explica en esta sección, y finalmente devolver la solución a su orientación inicial (rotando de nuevo todos los elementos un ángulo φ).

3.2.1 Maniobra Inicial en la Estrechez

La locomoción más rápida y eficiente para atravesar una estrechez consiste en colocar el cuerpo del robot completamente sobre una u otra pared de manera alterna, como ilustra la Figura 9. Este movimiento es la mejor opción ya que logra el máximo avance dentro de la estrechez, en cada paso. Para lograr este movimiento, el robot ha de iniciarlo con un pivote sobre cada pared.

El objetivo aquí es calcular el par de ángulos que debe rotar el robot (cada rotación alrededor de un pivote distinto) para alcanzar la posición inicial deseada.

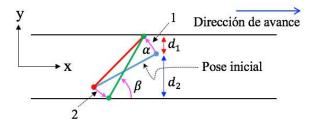


Figura 10: Situando cada pivote sobre una pared

Esta maniobra comienza buscando la mínima distancia "min $\{d_1, d_2\}$ " desde cada pared hasta el pivote delantero del robot (véase la Figura 10):

$$d_i = \frac{|a_i \cdot x_{delantero} + b_i \cdot y_{delantero} + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}}$$
(3)

donde cada pared $i \in \{1,2\}$ viene definida por su ecuación implícita: $a_ix + b_iy + c_i = 0$. La menor distancia obtenida indicará la pared sobre la que situar el pivote delantero.

Conocida la pared más cercana, hay que encontrar de nuevo un punto de ésta cuya distancia hasta el pivote trasero sea igual a la longitud del robot, como se realizó en las Figuras 6a y 8a. Este punto se obtiene resolviendo nuevamente la intersección entre la recta más cercana y una circunferencia centrada en el pivote trasero y de radio igual a la longitud del robot. Tras obtener este punto de intersección, se obtiene el ángulo α que se debe rotar el robot alrededor del pivote trasero para situar el delantero sobre el punto de intersección calculado.

Alcanzado este punto por el pivote delantero, debe realizarse de nuevo el mismo proceso para situar el pivote trasero sobre la pared opuesta, esta vez tomando como eje de rotación el pivote delantero.

3.2.2 Movimiento a lo Largo de la Estrechez

Tras alcanzar la posición inicial deseada, con cada pivote sobre una pared, el robot procede a desplazarse a lo largo de la estrechez hasta alcanzar su final. Este movimiento se consuma realizando siempre rotaciones con el mismo ángulo β , que es el ángulo formado entre el robot y las paredes cuando el robot tiene situado cada pivote en una pared diferente, como se indica en la Figura 10. Como se ha explicado antes, esta es la rotación óptima para avanzar por la estrechez, dado que produce el avance máximo a lo largo de la dirección de la estrechez.

El ángulo β se calcula como en la Figura 6b, es decir, restando la orientación φ de la recta de la orientación θ del robot. Después, el robot necesita alternar tanto el pivote de giro como el signo del ángulo β en cada paso. Así avanzará situándose en la paredes de forma alternada, como se ilustra en la Figura 9.

3.3 TRAYECTORIAS POLIGONALES CON ESTRECHECES

Tras resolver los dos problemas previos, esta subsección analiza la posibilidad de combinarlos. Esta combinación está basada en una gestión "en línea" por parte del robot mientras se desplaza, es decir, a medida que avanza en su trayecto, si el robot encuentra una estrechez, un cambio de dirección, o rotaciones sin restricciones de 180° a lo largo de una recta, ejecutará una de las acciones relevantes definidas en las subsecciones 3.1 y 3.2 anteriores.

Llegado este punto, también es importante tener en cuenta cómo el robot es capaz de afrontar estrecheces, esto es, cómo entra y sale de ellas.

Tomando como punto de partida cualquier estrechez, para resolver esta situación se ha optado por definir una área estrecha virtual al comienzo y al final de la estrechez real. Estas áreas serán prolongaciones virtuales de la estrechez, como ilustra la Figura 11:

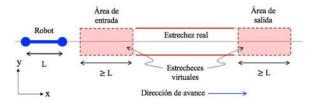


Figura 11: Entrando y saliendo de una estrechez

Por un lado, estudiando la entrada a la estrechez, cuando el pivote delantero del robot entre en la primera área virtual previamente mencionada (denotada como "Área de entrada" en la Figura 11), el robot entenderá que la estrechez está próxima. Entonces, se comportará como si ya estuviera dentro de ella: el robot ejecutará los movimientos correspondientes para situar sus pivotes en cada pared virtual (como en la Figura 10), y después avanzará usando la locomoción mostrada en la Figura 9, incluso si todavía se encuentra en la parte virtual de la estrechez. De este modo, está garantizado que el robot no intentará abordar la entrada de la estrechez ejecutando amplias rotaciones de 180°, las cuales pueden producir colisiones con las paredes de la estrechez antes de entrar en ella.

Por otro lado, para salir del tramo estrecho, se sigue un proceso similar. Esta vez el robot entiende que ha alcanzado el final de la estrechez cuando su pivote trasero abandona la segunda área virtual (denotada como "Área de salida", en la Figura 11).

Es importante comentar que, a fin de evitar cualquier tipo de colisión, la longitud de ambas áreas virtuales debe ser mayor o igual que la longitud L del robot.

Finalmente, una vez el robot está completamente fuera de la estrechez, realiza la serie de movimientos mostrados en la Figura 6 para recuperar la completa alineación de su cuerpo con la recta actual que debe seguir recorriendo mediante rotaciones de 180°.

4 EXPERIMENTOS

Esta sección presenta un par de experimentos para ilustrar los problemas y soluciones analizadas en la sección anterior.

4.1 COMPARACIÓN DE MODOS DE LOCOMOCIÓN

En la sección 3 se eligió la locomoción óptima como aquélla en la que el robot avanza realizando giros de 180° , ya que éstos maximizan la distancia recorrida en un solo paso. A continuación, exploraremos la optimalidad de esta elección, analizando el tiempo total requerido por el robot para recorrer un segmento recto con una longitud 100 veces mayor que el robot. Como la Figura 12a ilustra, se asumirá que inicialmente el robot está perpendicular al segmento a recorrer. Al principio, el robot rota $\alpha/2$ alrededor de uno de los pivotes, y a continuación comienza a rotar ángulos de " $-\alpha$ " o " $+\alpha$ " de manera alterna alrededor de uno u otro pivote, hasta alcanzar el final de la trayectoria. El tiempo total τ para completar esta trayectoria vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\tau = T \cdot M(\alpha) + \frac{\alpha}{2\omega} + \sum_{i=1}^{N(\alpha)} \frac{\alpha}{\omega} = T M(\alpha) + \frac{\alpha}{\omega} \left(N(\alpha) + \frac{1}{2} \right)$$
 (4)

donde se asume una velocidad angular constante ω (tomaremos $\omega=1$ rad/s por simplicidad). $M(\alpha)$ es el número total de veces que las unidades de adhesión se pegan Y despegan durante la trayectoria, mientras que $N(\alpha)$ es el número de rotaciones de ángulo " α " Y " $-\alpha$ " necesarias para completar la trayectoria (tanto M como N dependen de α). T es el tiempo que una unidad de adhesión tarda en pegarse o despegarse.

La Figura 12b representa cómo varía τ con α , para diferentes valores de *T*. Según se observa, para valores pequeños de T (es decir, usando unidades de adhesión que tardan poco en pegarse o despegarse), el tiempo mínimo τ se logra para valores de α entre 50° y 150°, aproximadamente (para cada T, el mínimo de τ se representa en la Figura 12b como un punto negro). Para valores suficientemente grandes de T (para T >7 s aproximadamente), es decir, para unidades de adhesión que toman algo de tiempo para pegarse o despegarse (por ejemplo, como ocurre con los imanes permanentes conmutables mecánicamente [8]), el mínimo tiempo τ se logra siempre aplicando rotaciones de $\alpha = 180^{\circ}$ al robot. Cabe destacar en la Figura 12b que, incluso para valores pequeños de T, el tiempo τ obtenido para $\alpha=180^{\circ}$ es solo ligeramente superior al tiempo mínimo que se obtendría al tomar el ángulo α óptimo para esos valores de T. Por tanto, $\alpha = 180^{\circ}$ es siempre una excelente elección para la locomoción del robot, como sugiere la intuición.

4.2 SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA DE EJEMPLO

Esta sección muestra un ejemplo del problema descrito en la sección 3.3, en el que el robot debe seguir trayectorias poligonales que contienen algunos tramos estrechos, aplicando las soluciones expuestas

en las secciones 3.1 y 3.2. Una trayectoria de ejemplo de este tipo se ilustra en la Figura 13, donde se indica la posición inicial y final del robot, así como diversas estrecheces. La Figura 13 muestra la secuencia de poses que el robot ha tomado al seguir esta trayectoria, secuencia obtenida aplicando los algoritmos y cálculos explicados en la sección 3. En la Figura 13, el robot siempre se representa como un segmento rojo.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo, hemos descrito el robot MASAR: un nuevo robot modular con un único actuador. Este robot es un RMUA de tipo 2 porque dispone de elementos de adhesión binarios que pueden pegarse o despegarse del entorno, con el fin de producir la rotación del robot alrededor de diferentes ejes, logrando así controlar el movimiento del robot en dos o tres dimensiones usando un único actuador. En este artículo se ha resuelto el problema de seguimiento de trayectorias del robot MASAR, en el caso de trayectorias poligonales con posibles tramos estrechos que coartan la amplitud de los movimientos del robot. El modo de locomoción propuesto consiste en realizar rotaciones de 180º cuando no existe riesgo de colisionar con obstáculos, con el fin de maximizar la distancia recorrida en un solo paso. En caso de encontrarse dentro de una estrechez, la locomoción óptima se logra rotando el robot hasta que sus dos pivotes tocan las paredes de la estrechez, ya que esta locomoción permite maximizar la distancia recorrida en un solo paso, sujeta a las restricciones de movimiento impuestas por los tramos estrechos.

En el futuro, abordaremos el problema de seguimiento de trayectorias del robot MASAR de manera más general, planteando un modelo cinemático del robot a nivel de velocidades, que nos permita ensayar diferentes leyes de control (por ejemplo, controladores PID) para seguir trayectorias planas arbitrarias, no necesariamente poligonales, en presencia obstáculos del entorno. En el futuro también estudiaremos los problemas ilustrados en las Figuras 4 y 5, es decir, la planificación de trayectorias que cóncavas transiciones incluyan entre perpendiculares, y la combinación y colaboración de varios módulos para formar robots articulados capaces de realizar tareas más complejas. Por último, actualmente también estamos desarrollando un prototipo funcional del robot MASAR.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido respaldado por el Ministerio de Educación a través de una beca-colaboración concedida al segundo autor, y por el Ministerio de Economía a través del proyecto DPI 2016-78361-R.

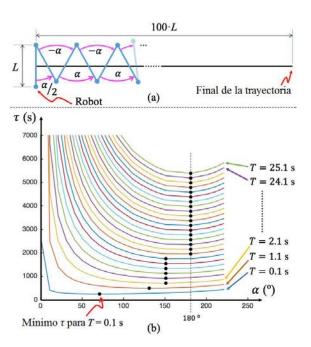


Figura 12: Tiempo τ para completar una trayectoria recta en función del ángulo de avance α

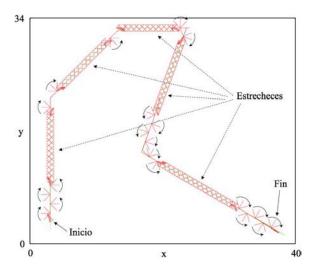


Figura 13: Ejemplo de seguimiento de trayectoria poligonal con estrecheces

English summary

TRAJECTORY PLANNING OF A MODULAR MOBILE ROBOT WITH A SINGLE ACTUATOR

Abstract

This paper presents a modular mobile robot that is capable of controlling its position and orientation along a plane using a single actuator. To that end, the body of the robot has several adhesion units that can be attached to the environment, such that the robot

will rotate about the fixed adhesion unit when powering its only actuator. By alternately attaching some or other adhesion units to the environment, the robot can freely move along a plane, and it is even capable of performing concave transitions between orthogonal planes, or combining with other identical modules in order to form complex reconfigurable robots. In this paper, we solve the trajectory planning of the proposed robot in a plane, assuming that the desired trajectories are polygonal and include narrow sections that are difficult to traverse.

Keywords: single-actuator robots, trajectory planning, climbing robots, modular robots, alternating pivot, adhesion unit

Referencias

- [1] Birkmeyer, P., Gillies, A. G., Fearing, R. S., (2011). CLASH: Climbing vertical loose cloth. In 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5087-5093.
- [2] Cheng, N., Ishigami, G., Hawthorne, S., Chen, H., Hansen, M., Telleria, M., Playter, R., Iagnemma, K., (2010). Design and analysis of a soft mobile robot composed of multiple thermally activated joints driven by a single actuator. In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5207-5212.
- [3] Choi, H. C., Jung, G. P., Cho, K. J., (2015). Design of a milli-scale, biomimetic platform for climbing on a rough surface. In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 2205-2210.
- [4] Dharmawan, A. G., Hariri, H. H., Foong, S., Soh, G. S., Wood, K. L., (2017). Steerable miniature legged robot driven by a single piezoelectric bending unimorph actuator. In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6008-6013.
- [5] Ho, T., Lee, S., (2012). A novel design of a robot that can jump and roll with a single actuator. In 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 908-913.
- [6] Hoover, A. M., Burden, S., Fu, X. Y., Sastry, S. S., Fearing, R. S., (2010). Bio-inspired design and dynamic maneuverability of a minimally

- actuated six-legged robot. In 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pp. 869-876.
- [7] Mir-Nasiri, N., Siswoyo, H., Ali, M. H., (2018). Portable autonomous window cleaning robot. *Procedia Computer Science*, 133, 197-204.
- [8] Peidró, A., Tavakoli, M., Marín, J. M., Reinoso, Ó., (2019). Design of compact switchable magnetic grippers for the HyReCRo structureclimbing robot. *Mechatronics*, 59, 199-212.
- [9] Refael, G., Degani, A., (2015). Momentumdriven single-actuated swimming robot. In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2285-2290.
- [10] Sfeir, J., Shammas, E., Asmar, D., (2014). Design and modeling of a novel single-actuator differentially driven robot. In 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 1079-1084.
- [11] Soyguder, S., Alli, H., (2011). Motion mechanism concept and morphology of a single actuator tetrapod walking spider robot: the ROBOTURK SA-2 Robot. *Industrial Robot: An International Journal*, 38(4), 361-371.
- [12] Zarrouk, D., Fearing, R. S., (2015). Controlled in-plane locomotion of a hexapod using a single actuator. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(1), 157-167.
- [13] Zarrouk, D., Mann, M., Degani, N., Yehuda, T., Jarbi, N., Hess, A., (2016). Single actuator wavelike robot (SAW): design, modeling, and experiments. *Bioinspiration & biomimetics*, 11(4), 046004.
- [14] Zhao, J., Xu, J., Gao, B., Xi, N., Cintron, F. J., Mutka, M. W., Xiao, L., (2013). MSU jumper: A single-motor-actuated miniature steerable jumping robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(3), 602-614.



© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es).