

JORNADAS de ROBÓTICA, EDUCACIÓN y BIOINGENIERÍA 2022

XII Jornadas Nacionales de Robótica
VIII Seminario de Educación en Automática
XIII Simposio CEA de Bioingeniería

Málaga, 18-20 de mayo, 2022



Colaboran



Libro de actas

de las

JORNADAS de ROBÓTICA, EDUCACIÓN y BIOINGENIERÍA 2022

XII Jornadas Nacionales de Robótica
VIII Seminario de Educación en Automática
XIII Simposio CEA de Bioingeniería

Málaga, 18-20 de mayo, 2022

Edita: Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Málaga

ISBN: 978-84-09-41095-8

Índice

COMUNICACIONES

UNA NUEVA OPORTUNIDAD DE ATENCIÓN A LAS PERSONAS MAYORES MEDIANTE ROBÓTICA SOCIAL EN LAS RESIDENCIAS LACORT (UNO MÁS) <i>Eduardo Zalama, Jaime Gómez-García-Bermejo, Pablo Francisco Viñas, Luis Cobo Hurtado, José María Delgado Sanz, Beatriz Vielba</i>	4
ROBOT DE CABLES PARA LA LIMPIEZA DE VENTANAS <i>S. Santamaría, E. Zalama, J. Gómez</i>	12
HACIA LA RECOGIDA DE RESIDUOS DOMESTICOS EN EXTERIORES: ENFOQUE VISUAL-TACTIL <i>P. Gil, S.T. Puente, J. Castaño-Amorós, I. L. Páez-Ubieta</i>	17
SISTEMA ROBOTICO INTELIGENTE DE EXPLORACION TERMICA PARA MISIONES DE BUSQUEDA Y RESCATE <i>Christyan Cruz Ulloa, Guillermo Prieto, Jaime del Cerro, Antonio Barrientos</i>	25
APLICANDO HERRAMIENTAS PSICOLÓGICAS PARA INCREMENTAR EL VÍNCULO ENTRE LOS USUARIOS Y LOS ROBOTS SOCIALES <i>Fernando Alonso Martín, Sara Carrasco Martínez, Marcos Maroto Gómez, Javier Sevilla Salcedo, Miguel Á. Salichs</i>	32
ROMERIN: ORGANISMO ROBÓTICO ESCALADOR BASADO EN PATAS MODULARES CON VENTOSAS ACTIVAS <i>Carlos Prados, Miguel Hernando, Ernesto Gambao, Alberto Brunete</i>	40
SISTEMA ROBÓTICO MÓVIL PARA EL ANÁLISIS DE LA MARCHA HUMANA SIN MARCADORES E IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS NEUROLÓGICAS, ROBOGAI <i>Diego Guffanti, Alberto Brunete, Miguel Hernando, Ernesto Gambao, David Álvarez</i>	50
CREACIÓN DE MAPAS DE NAVEGACIÓN PARA UN ROBOT TREPADOR DE ESTRUCTURAS RETICULARES <i>F.J. Soler, A. Peidró, M. Fabregat, L. Payá, O. Reinoso</i>	57
ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE UN EXOESQUELETO HÍBRIDO PARA REHABILITACIÓN DE LAS EXTREMIDADES SUPERIORES <i>J. Carrillo-Ríos, D. Cantalejo-Escobar, D. Pont-Esteban, A. Contreras González, M. A. Sánchez-Urán, M. Ferre</i>	64
ORIGAMI KRESLING PATTERN AS SOFT SCALABLE LINK <i>L. Mena, C.A. Monje, C. Balaguer</i>	70
SISTEMA DE MONITORIZACIÓN NO INTRUSIVA PARA EL RECONOCIMIENTO DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS MULTIUSUARIO <i>R.G. Ramos, J.D. Domingo, E. Zalama, J. G. García-Bermejo</i>	75
MÉTODO DE ODOMETRÍA BASADA EN PLANOS PARA CÁMARAS DE PROFUNDIDAD <i>Andres Galeote-Luque, Jose-Raul Ruiz-Sarmiento, Javier Gonzalez-Jimenez</i>	83
INTEGRACIÓN DE SMARTPHONES 5G EN REDES DE SENSORES DISTRIBUIDAS PARA ROBÓTICA DE EXTERIORES MEDIANTE ROS Y ANDROID <i>Germán Ruiz Mudarra, Juan Bravo Arrabal, J.J. Fernández Lozano, Alfonso García Cerezo</i>	91

DISEÑO DE LA CONFIGURACIÓN DE BRAZOS ROBÓTICOS VESTIBLES PARA TAREAS DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO <i>J. Álvarez-Pastor, D. Martínez-Pascual, A. Blanco, L.D. Lledó, C. Fernández-Irles, N. García-Aracil, F. López-Labrador, Á. Bernal-Plaza</i>	100
HIMTAE: SISTEMA HETEROGÉNEO MULTIROBOT PARA AYUDA DE PERSONAS MAYORES EN UN AMBIENTE ASISTIDO EN EL HOGAR <i>Ramón Barber, Francisco J. Ortiz, Francisco M. Calatrava, Santiago Garrido, Luis Moreno, José Alfonso Vera, Alicia Mora, Adrián Prados, Joaquín Roca, Manuel Jiménez, Inmaculada Méndez, Cecilia Ruiz-Esteban, Óscar M. Mozos</i>	106
EXPLORACIÓN DE ENTORNOS DESCONOCIDOS MEDIANTE VEHÍCULOS TERRESTRES BASADA EN LA ENTROPÍA <i>Jaime Godoy Calvo, Dahui Lin Yan y Ricardo Vázquez-Martín</i>	118
IDENTIFICACIÓN DE UN CUELLO ROBÓTICO BLANDO MEDIANTE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO <i>Nicole Continelli, Luis Nagua, Concepción A. Monje y Carlos Balaguer</i>	124
ROBOMINER: ROBOT MODULAR RESILIENTE PARA OPERACIONES MINERAS <i>V. Gómez, D. Collados, E. Aguado, M. Hernando, R. Sanz, C. Rossi</i>	132
AUTOMATIZACIÓN DEL PEGADO DE LAS GARRAS MAGNÉTICAS DE UN ROBOT TREPADOR BÍPEDO <i>Marc Fabregat, Adrián Peidró, Óscar Reinoso, Francisco José Soler, Luis Miguel Jiménez</i>	139
EVALUACIÓN AUTOMATIZADA DE LA COORDINACIÓN Y DESTREZA MANUAL FINA USANDO SERIOUS GAMES <i>E.D. Oña, C. Balaguer, y A. Jardón</i>	149
MÉTODO DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS Y NAVEGACIÓN PARA UN ROBOT AUTÓNOMO SUBTERRÁNEO (uSLAM) <i>E. Menéndez, J. Yagüez, S. Martínez, C. Balaguer</i>	156
DETECCIÓN DE PARTES DEL CUERPO EN IMÁGENES MULTIMODALES DE BÚSQUEDA Y RESCATE <i>Alejandro González Centeno, Ricardo Vázquez-Martín, Anthony Mandow y Alfonso García-Cerezo</i>	161
<hr/> RESÚMENES EXTENDIDOS <hr/>	
DETECCIÓN Y RECOGIDA DE MUESTRAS POR VEHÍCULOS DE EXPLORACIÓN PLANETARIA <i>Laura M. Mantoani, Raúl Castilla Arquillo, Gonzalo J. Paz Delgado, Carlos J. Pérez del Pulgar and Martin Azkarate</i>	169
FROM TRADITIONAL TO FEW-SHOT LEARNING AND ITS APPLICATION IN NATURAL LANGUAGE GENERATION IN ROBOTICS <i>Javier Sevilla Salcedo, Sara Carrasco Martínez, J. C. Castillo, Á Castro-González, M. Malfaz, F. Alonso-Martín, Miguel A. Salichs</i>	172

AUTOMATIZACIÓN DEL PEGADO DE LAS GARRAS MAGNÉTICAS DE UN ROBOT TREPADOR BÍPEDO

Marc Fabregat*, Adrián Peidro, Óscar Reinoso, Francisco José Soler, Luis Miguel Jiménez
Grupo de Automatización, Robótica, y Visión por Computador, Universidad Miguel Hernández (UMH)

Avda. de la Universidad s/n, Edificio Innova, 03202 Elche (Alicante), Spain

*Corresponding author. Emails: marc.fabregat@goumh.umh.es, apeidro@umh.es

Resumen

Los robots trepadores se emplean para realizar tareas de inspección y mantenimiento en posiciones elevadas de difícil acceso en estructuras verticales, evitando que un operario humano tenga que subir a dichas posiciones elevadas y corra el riesgo de caer. Para poder trepar por dichas estructuras, los robots trepadores bípedos disponen de pies con garras que van despegando o pegando a la estructura de forma alterna para lograr la locomoción. Para lograr el pegado de dichas garras con éxito, primero es crucial posicionarlas y orientarlas adecuadamente sobre la superficie donde adherirlas, ya que un posicionamiento deficiente puede provocar que el robot quede forzado tras la adhesión, o puede impedir la adhesión completamente. Este artículo presenta un algoritmo para automatizar el pegado de las garras magnéticas de un robot trepador bípedo. El algoritmo propuesto se basa en la estimación de la pose relativa entre la garra a pegar y la superficie donde se desea pegarla, mediante tres sensores láser. Tras estimar dicha pose relativa, un algoritmo de resolución de cinemática inversa por Jacobiana permite ajustar automáticamente la postura del robot hasta lograr el pegado deseado. Los resultados del algoritmo se ilustran mediante simulaciones y experimentos reales.

Palabras clave: robot trepador, adhesión magnética, Jacobiana, cinemática inversa, sensor láser.

1 INTRODUCCIÓN

Los robots trepadores se emplean para realizar tareas en altura como la inspección o mantenimiento de estructuras verticales industriales, para detectar y reparar grietas u otros defectos. Tales tareas son poco deseables para ser realizadas por operarios humanos debido a que suelen requerir trabajar en zonas de difícil acceso a alturas considerables, que someten al operario a riesgos como la caída desde altura.

Existe una gran variedad de robots trepadores para realizar trabajos en altura. Los robots trepadores pueden clasificarse según su método de locomoción o

según su tecnología de adhesión [9]. Atendiendo a su método de locomoción, se distingue principalmente entre robots basados en patas y robots basados en ruedas/orugas, siendo los primeros los que ofrecen una mayor capacidad de maniobra a costa de una mayor complejidad y lentitud. Atendiendo a las tecnologías de adhesión, que permiten a los robots trepadores sujetarse a superficies verticales y treparlas contra la gravedad, las principales opciones son la sujeción mecánica mediante pinzas con dedos (lo cual requiere poder acceder a dos caras opuestas de la superficie trepada para poder asirla) y la sujeción por medios magnéticos o por succión, que permiten adherir el robot a la superficie trepada cuando ésta solo tiene una cara accesible. Para las tareas de inspección y mantenimiento en estructuras verticales industriales metálicas, la tecnología de adhesión preferida suele ser la adhesión magnética.

Dentro de los robots trepadores basados en patas, destacan los bípedos, que constan de una cadena cinemática en cuyos extremos hay sendas garras que pueden adherirse o sujetarse a la superficie trepada, mediante cualquiera de las tecnologías mencionadas antes. El principio de funcionamiento de estos robots trepadores bípedos es el siguiente. Primero se fija una de las garras a la superficie, estando libre la otra garra. A continuación, articulando la cadena cinemática que conecta ambas garras, se desplaza la garra libre hasta el siguiente punto de sujeción, donde ésta se adhiere. Seguidamente, se libera la garra que estaba originalmente fija, que pasa a convertirse en la nueva garra libre. Los roles de las garras fija y libre quedan así intercambiados y se inicia un nuevo ciclo de movimiento. Los robots trepadores bípedos que siguen este principio de locomoción también se denominan de tipo “paso-a-paso” [10]. El robot trepador que se estudiará en este artículo pertenece a este grupo de robots, utilizando garras magnéticas.

En un robot trepador de tipo paso-a-paso, una de las operaciones cruciales es el pegado de la garra libre en su nuevo punto de sujeción. Para que dicha operación sea correcta, es esencial que la garra libre, antes de ser pegada en una nueva posición, se encuentre a la distancia apropiada de la superficie a adherirse, y con la orientación correcta. De otro modo, una colocación

deficiente de la garra libre previamente a su pegado provocará tensiones internas en la cadena cinemática del robot (que quedará “forzada”, con sus dos extremos pegados al entorno), o directamente provocará un pegado fallido que podría resultar en la caída del robot, pudiendo dañar al mismo robot o a su entorno. Antes de realizar dicho pegado, por tanto, es esencial que el operario encargado de supervisar o teleoperar el robot se asegure de que la garra libre ha sido situada con la posición y orientación correctas. No obstante, el ajuste manual de dicha posición y orientación de la garra libre es muy complicado, debido a que el operario normalmente no dispone de un buen punto de vista desde el que poder observar la pose de dicha garra. Hay que tener en cuenta que estos robots suelen trabajar en zonas a altura mientras que el operario se encuentra en tierra firme, por lo que el operario únicamente podría visualizar el movimiento de la garra libre a través de una cámara a bordo del robot, que no proporciona una buena perspectiva para facilitar el ajuste manual de la posición y orientación de la garra libre. Es necesario, por tanto, automatizar dicha operación de ajuste.

Diversos trabajos previos sobre robots trepadores de tipo paso-a-paso han propuesto diferentes métodos para automatizar el proceso de pegado o sujeción de la garra libre. Por ejemplo, Tavakoli et al. [11] utilizan un sensor óptico GP2Y0A21 para medir y ajustar la distancia entre las barras cilíndricas de la estructura trepada y las garras de su robot trepador. En este caso, dado que los dedos de las garras tienen forma de V, se produce un auto-centrado de la garra que garantiza una sujeción correcta, por lo que basta un sensor que mida la distancia barra-garra. En [1] se presenta un robot trepador de tipo paralelo basado en la plataforma de Stewart, que puede trepar por estructuras cilíndricas como árboles o tuberías, envolviendo las barras de la estructura con su cuerpo anular. En este caso, la sujeción del robot se produce mediante pistones que aprisionan la barra trepada de forma radial al cuerpo del robot, de forma similar a la luneta de un torno. Para que dicha sujeción sea correcta, es necesario primero centrar el cuerpo anular del robot para hacerlo coaxial con la barra trepada, y dicho auto-centrado se automatiza mediante las medidas de tres sensores ultrasónicos dispuestos cada 120° en el cuerpo anular.

Otros trabajos combinan sensores de diversa naturaleza, como una cámara monocular para segmentar la barra a asir (dicha barra se proyecta en la imagen como un trapecio) junto a sensores láser [13,4] y ultrasónicos [13] para estimar el radio de la barra y la profundidad a la que ésta se encuentra. También es posible utilizar directamente una cámara RGB-D [3] para obtener toda esa información sin más sensores. El algoritmo descrito en [14] también combina diversos tipos de sensores para automatizar el pegado de las garras de su robot, ya que cada garra incorpora tres

sensores ultrasónicos repartidos cada 120° en el plano de la garra, junto a un inclinómetro para determinar la dirección del vector gravedad.

Por último, a diferencia de los trabajos citados hasta ahora, los cuales se basan en sensores sin contacto (ultrasónicos, cámaras, láser...), otros robots realizan el ajuste de la garra mediante sensores de contacto. Sería el caso, por ejemplo, del robot trepador descrito en [12], que combina “bigotes” como sensores de contacto junto a sensores de presión, con el fin de estimar el vector normal a la superficie de pegado. Finalmente, el robot presentado en [8] no emplea sensores de contacto ni de rango, sino que cada garra dispone de una barra que hace tope con la estructura a la que la garra debe adherirse, de modo que dicho tope ayuda a que la posición de la garra sea la correcta para poder realizar la sujeción.

En este artículo se describe el proceso de automatización del pegado de las garras magnéticas de un robot trepador bípedo diseñado para trepar por estructuras metálicas. La solución aquí presentada es similar a la descrita en [14] en el hecho de que se emplean tres sensores de rango formando un triángulo equilátero para estimar el plano al que debe sujetarse la garra libre del robot, aunque hay tres diferencias:

- La solución aquí presentada prescinde del inclinómetro utilizado en [14].
- Los sensores aquí utilizados son ópticos, mientras que [14] usa de tipo ultrasónico. En este trabajo se requieren sensores ópticos porque permiten detectar distancias más pequeñas que los ultrasónicos.
- El algoritmo de ajuste aquí presentado se basa en la matriz Jacobiana, de modo que se resuelve el problema cinemático inverso a nivel diferencial o de velocidades. Esto permite aplicar el algoritmo a robots con arquitectura general, para los que no exista una solución analítica para la cinemática inversa y se tenga que recurrir a métodos iterativos basados en la Jacobiana.

El resto de este artículo está organizado como sigue. En la Sección 2 se describe el robot trepador bípedo para cuyas garras magnéticas se ha automatizado el proceso de pegado. En la Sección 3 se describe el algoritmo de pegado, que consiste en el uso de tres sensores ópticos para estimar la diferencia entre la pose deseada de pegado y la pose actual de la garra libre, junto con un ajuste iterativo basado en la matriz Jacobiana para hacer tender dicha diferencia a cero. La Sección 4 presenta algunos experimentos simulados del algoritmo desarrollado, mientras que la Sección 5 presenta experimentos reales. Por último, la Sección 6 concluye este trabajo y apunta algunas direcciones de trabajo futuro.

2 ROBOT HYRECRO

En esta sección se presenta el robot bípedo trepador de estructuras llamado “HyReCRo”, para el que se desarrollará e implementará el algoritmo de pegado propuesto en este artículo.

El robot HyReCRo, mostrado en la Figura 1, es un robot trepador bípedo formado por dos patas unidas a una cadera, y en los pies de dichas patas dispone de sendas garras magnéticas con las que pegarse a superficies ferromagnéticas. Se trata de un robot de tipo paso-a-paso como los descritos en la introducción de este artículo. La cadena cinemática que va de una garra a la otra está formada por dos patas unidas a la cadera mediante articulaciones de rotación (θ_A y θ_B), actuadas por motores DC. A su vez, cada pata está formada por la unión en serie de dos mecanismos de tipo paralelo (del tipo destacado en la Figura 1 en color rojo) actuados mediante actuadores lineales eléctricos también de tipo DC. Por tanto, la cadena cinemática del robot es de tipo híbrido serie-paralela, y además es cinemáticamente redundante, pues dispone de más de 6 grados de libertad, que es el mínimo número de grados de libertad necesario para posicionar y orientar una garra de forma totalmente arbitraria respecto a la otra garra (de ahí el nombre de este robot: HyReCRo – Hybrid Redundant Climbing Robot).

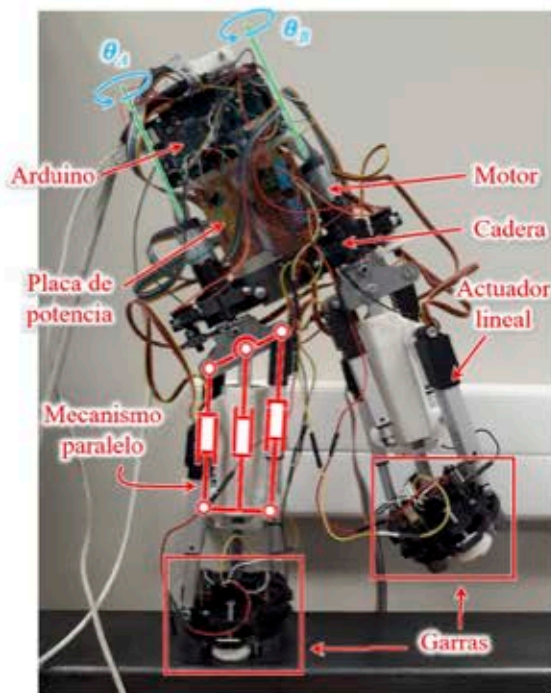


Figura 1: Prototipo del robot trepador HyReCRo tal como fue presentado en [7]

Aunque se trata de un robot serie-paralelo, a nivel global puede modelarse de forma simplificada como un robot serie equivalente de 8 grados de libertad

como el mostrado en la Figura 2, con seis articulaciones de rotación $\{\varphi_{ij}, \theta_j\}$ y dos articulaciones prismáticas $\{y_j\}$ ($i=1,2, j=A,B$). Los desplazamientos articulares reales del robot serie-paralelo pueden obtenerse a partir de los desplazamientos articulares del robot serie equivalente tal y como se describe en [5]. En el resto de este artículo trabajaremos con la cinemática del equivalente serie del robot, cuyos parámetros Denavit-Hartenberg (DH) se recogen en la Tabla 1.

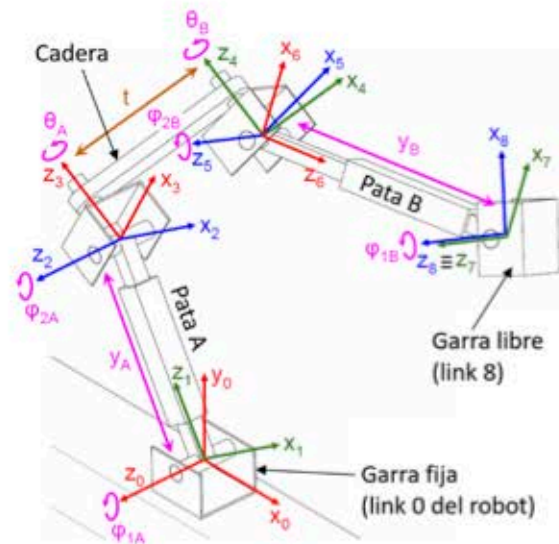


Figura 2: Equivalente serie del robot HyReCRo

Tabla 1: Parámetros DH del robot de la Figura 2.

Link $i-1 \rightarrow i$	θ_i rot. z_{i-1}	d_i trans. z_{i-1}	a_i trans. x_i	α_i rot. x_i
0 \rightarrow 1	φ_{1A}	0	0	-90°
1 \rightarrow 2	0	y_A	0	$+90^\circ$
2 \rightarrow 3	φ_{2A}	0	0	-90°
3 \rightarrow 4	θ_A	0	$t=11\text{cm}$	0
4 \rightarrow 5	θ_B	0	0	$+90^\circ$
5 \rightarrow 6	φ_{2B}	0	0	$+90^\circ$
6 \rightarrow 7	0	y_B	0	-90°
7 \rightarrow 8	φ_{1B}	0	0	0

Puesto que está diseñado para trepar y operar en estructuras metálicas, este robot utiliza adhesión magnética para fijar sus extremos a las superficies. En [7] se presentó un prototipo de este robot con garras equipadas con imanes permanentes conmutables mecánicamente, que activan o desactivan la adhesión magnética rotando 180° un imán permanente, de modo que su campo magnético se redirija y se cierre a través de la superficie trepada (pegándose a ella) o a través de un circuito interno (no pegándose). Sin embargo, en [7] el control del posicionamiento de la garra como paso previo para su pegado lo realizaba un operario de forma manual, teleoperando el robot con un joystick

Tabla 2: Especificaciones típicas de las tecnologías más comunes usadas en sensores de distancia.

Tecnologías	Rango mínimo	Rango máximo	Resolución	Frecuencia	Coste
Ultrasonidos	Alto	Medio	Variable	Baja	Variable
Infrarrojos	Bajo	Bajo	Media	Media	Bajo
LiDAR	Variable	Muy alto	Media	Muy alta	Alto
VCSEL	Muy bajo	Muy bajo	Muy baja	Media	Medio

y guiándose por su propia vista, lo cual dificulta el proceso de pegado ya que, de ese modo, es difícil ajustar con precisión la posición y orientación de la garra libre para colocarla en paralelo a escasos milímetros de la superficie donde debe ser pegada.

La automatización de la tarea de adhesión es compleja, puesto que debe realizarse manteniendo una orientación paralela a la superficie de pegado, con una distancia mínima. Si, en el momento de activar los imanes de la garra, ésta se encuentra demasiado lejos de la superficie donde pegarla, o no está suficientemente paralela a dicha superficie, la fuerte adhesión magnética provocará el acercamiento forzado de la garra hacia la superficie hasta pegarse a ella, de modo que el robot quedará forzado o tensionado, ya que su posición de reposo (antes de activar el pegado) mantenía la garra libre a cierta distancia de la superficie donde se ha terminado pegando. Esto podría producir daños en los actuadores del robot y/o en su estructura mecánica. En la siguiente sección de este artículo se perseguirá automatizar este proceso de acercamiento y adhesión mediante un algoritmo que, usando las medidas tomadas por varios sensores de distancia, realice el ajuste y acercamiento de la garra de forma fina.

3 ALGORITMO DE PEGADO

La solución propuesta para automatizar el pegado de la garra consiste en un control cinemático de la aproximación utilizando tres sensores de distancia ubicados en la garra. A partir de las lecturas de los sensores, se calcula en cada instante el vector de diferencia $\Delta \xi$ entre la pose (posición y orientación) actual de la garra y la pose deseada sobre superficie donde ésta debe pegarse, y dicha diferencia se introduce a un algoritmo basado en Jacobiana para producir el movimiento del robot hasta completar la aproximación.

La selección de los sensores empleados se ha basado en un estudio de las diferentes tecnologías disponibles en el mercado. En la Tabla 2 se muestra la comparación entre las especificaciones típicas de las tecnologías más comunes. Con el fin de realizar una aproximación fina, se precisa que los sensores sean capaces de medir magnitudes muy pequeñas y con una

buena resolución, de manera que se ha optado por emplear sensores VCSEL (modelo VL6180X) por el bajo rango mínimo y la alta resolución que ofrecen. Como se ha indicado previamente, es necesario que la garra se aproxime lo suficiente a la superficie de pegado para evitar que el robot quede forzado tras activar los imanes, por lo que los sensores a utilizar tendrán que ser capaces de medir distancias pequeñas. En la Figura 3 se muestra la disposición de los sensores montados en la garra. Como puede observarse en dicha figura, la garra consta de tres imanes permanentes conmutables formando un triángulo equilátero [7]. Los sensores añadidos en el presente artículo también forman otro triángulo equilátero más externo, de forma que permiten obtener la distancia a tres puntos situados sobre la superficie donde ha de pegarse la garra.

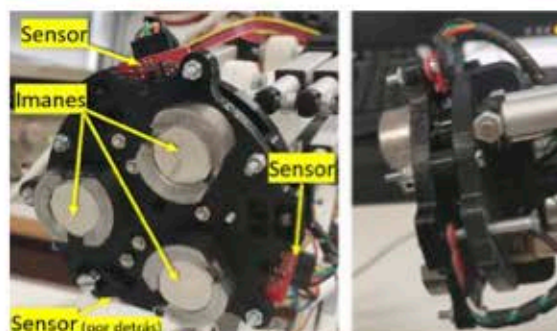


Figura 3: Detalle de la garra magnética, y de los sensores ópticos montados en ella

A continuación, se propone un algoritmo que permite el acercamiento de la garra de una forma controlada y automática. En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo propuesto, mientras que en la Figura 5 se ilustra esquemáticamente la situación previa al pegado, donde el robot mantiene su garra libre a cierta distancia del plano donde ésta debe pegarse. En los siguientes párrafos se describirán los pasos de este algoritmo.

El primer paso consiste en tomar una lectura de las distancias (d_1 , d_2 , d_3) medidas por los tres sensores. Cada sensor emite un haz perpendicular al plano α de la garra, hasta intersectar con el plano β donde debe pegarse ésta, y proporciona una medida de la distancia desde el sensor hasta el punto de intersección. Para tratar de eliminar el inevitable ruido de las medidas de

los sensores, éstas se pasan por un filtro paso-bajo digital de primer orden con una frecuencia de corte de 0.5 Hz.

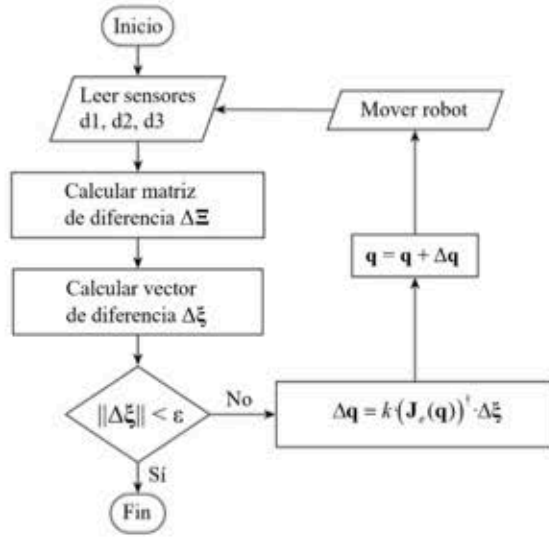


Figura 4: Algoritmo de aproximación

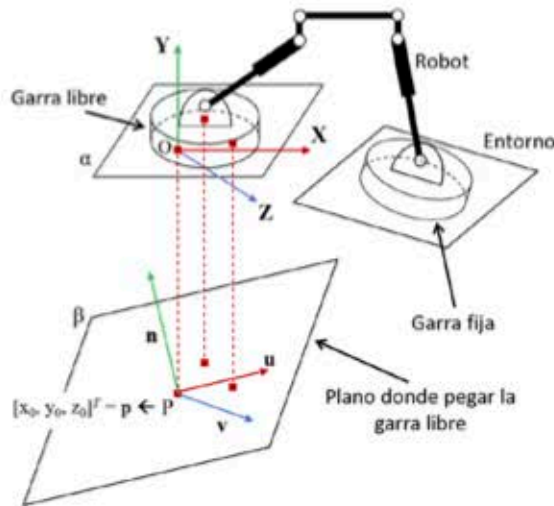


Figura 5: Sistemas de referencia y planos relevantes

Seguidamente, a partir de esas distancias (d1, d2, d3), se calcula la matriz de diferencia $\Delta\Xi$, que es una matriz de transformación homogénea que codifica la posición y orientación de la superficie de pegado respecto a la garra. En la Figura 5, el plano α de la garra está definido por los tres sensores. Solidario a este plano α hay un sistema de referencia OXYZ con origen O en el primer sensor, siendo Y perpendicular a α . Por otro lado, el plano β donde debe pegarse la garra está definido por los puntos de intersección de los haces de los sensores con dicho plano β . Solidario al plano β hay otro sistema de referencia $Punv$, donde n es perpendicular a β y el punto P es el punto de intersección del haz del primer sensor con el plano β .

La matriz de diferencia $\Delta\Xi$ entre ambos sistemas de referencia puede calcularse de la siguiente manera:

$$\Delta\Xi = \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{n} & \mathbf{v} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde $\mathbf{p} = \mathbf{r}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ es la posición del punto P respecto al sistema de referencia OXYZ, y donde la submatriz de rotación está formada por tres vectores ortonormales $\{\mathbf{u}, \mathbf{n}, \mathbf{v}\}$ que son los ejes del sistema de referencia $Punv$ solidario al plano de pegado, respecto al sistema de referencia de la garra. El objetivo del algoritmo de pegado es mover la garra libre hasta que su sistema de referencia coincida con el del plano de pegado, es decir, hasta que $\Delta\Xi$ sea la matriz identidad. Como se comentará posteriormente, en realidad no es necesario que todas las componentes de posición y orientación sean idénticas entre ambos sistemas de referencia: para asegurar un pegado, lo esencial es que, en primer lugar, el plano α de la garra sea paralelo al plano β (es decir, que el eje Y de la garra sea paralelo a \mathbf{n}), y en segundo lugar, que la coordenada y_0 de P respecto a OXYZ sea negativa y casi nula, garantizando el contacto previo a activar el pegado. Ambas condiciones ($\mathbf{Y} // \mathbf{n}$ y $y_0 \approx 0$) permiten el pegado de la garra en el plano β , siendo irrelevante el giro que la garra tenga alrededor del eje \mathbf{n} , y siendo también irrelevantes los desplazamientos de la garra a lo largo de los ejes \mathbf{uv} , dentro de ciertos límites (mientras que la garra no se salga de los límites de dicho plano).

Conociendo las distancias de los sensores a los puntos de intersección de sus haces láser con el plano de pegado β , se conocen los vectores de posición \mathbf{r}_i de dichos puntos de intersección respecto al sistema de referencia OXYZ de la garra. En ese caso, el vector \mathbf{n} normal al plano β se puede calcular como el producto vectorial de dos vectores contenidos en el plano β y definidos por los tres puntos de intersección:

$$\mathbf{n} = \frac{(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_2)}{\|(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_2)\|} \quad (2)$$

Una vez se conoce el vector $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$, se obtiene un vector \mathbf{u} perpendicular a \mathbf{n} de la siguiente manera:

$$\mathbf{u} = \frac{\begin{bmatrix} n_y & -n_x & 0 \end{bmatrix}^T}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad (3)$$

Finalmente, se completa el triedro con el vector \mathbf{v} como producto vectorial de \mathbf{u} y \mathbf{n} : $\mathbf{v} = \mathbf{u} \times \mathbf{n}$. De este modo se completa el cálculo de la matriz de diferencia $\Delta\Xi$, que representa la pose de pegado deseada respecto a la pose actual de la garra libre.

El siguiente paso es convertir esta matriz de diferencia $\Delta \Xi$ en un vector $\Delta \xi$ de dimensiones 6×1 que almacene la diferencia entre ambas poses, para utilizar este vector de diferencia en un algoritmo Jacobiano de resolución de la cinemática inversa. Las tres primeras componentes del vector $\Delta \xi$ coinciden con las del vector \mathbf{p} . Las tres últimas componentes de $\Delta \xi$ se corresponden con tres rotaciones infinitesimales conmutativas ω_x , ω_y y ω_z alrededor de los ejes \mathbf{X} , \mathbf{Y} y \mathbf{Z} de la garra, respectivamente. Idealmente, dichas rotaciones son infinitesimales, aunque esto solo es cierto cuando la diferencia entre ambas poses es suficientemente pequeña (lo cual se vuelve cierto a medida que el algoritmo converge al pegado deseado). Dichas rotaciones serían las necesarias para orientar el sistema de referencia de la garra y dejar sus ejes (XYZ) paralelos a los del sistema de referencia del plano de pegado (unv). Estas rotaciones ω_i pueden obtenerse restando la matriz identidad a la submatriz de rotación de $\Delta \Xi$, lo cual resulta en una matriz antisimétrica de la que se pueden extraer las ω_i [2]:

$$[\mathbf{u}, \mathbf{n}, \mathbf{v}] - \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

De nuevo, cabe incidir en que esta resta únicamente resulta en una matriz antisimétrica a medida que el algoritmo converge, ya que en ese caso la diferencia entre la pose de la garra y la deseada se vuelve suficientemente pequeña.

Una vez se tiene el vector diferencia, se aplica el algoritmo basado en Jacobiana mostrado en la Figura 4, donde el vector $\mathbf{q} = [\varphi_{1A}, y_A, \varphi_{2A}, \theta_A, \theta_B, \varphi_{2B}, y_B, \varphi_{1B}]^T$ de coordenadas articulares se va actualizando iteración tras iteración según el siguiente incremento:

$$\Delta \mathbf{q} = k \cdot (\mathbf{J}_e(\mathbf{q}))^\dagger \cdot \Delta \xi \quad (5)$$

donde k es una ganancia para ajustar la velocidad de convergencia del algoritmo y \mathbf{J}_e^\dagger es la pseudoinversa de la Jacobiana \mathbf{J}_e , que proporciona la solución de mínima norma para $\Delta \mathbf{q}$ (recuérdese que se trata de un robot cinemáticamente redundante y por tanto su matriz Jacobiana es de tamaño 6×8).

En la Ecuación (5), la Jacobiana \mathbf{J}_e es la matriz que transforma los pequeños incrementos articulares $\Delta \mathbf{q}$ en pequeños cambios $\Delta \xi$ de la posición y orientación de la garra libre del robot, pero es importante destacar que dichos cambios están expresados respecto a los ejes del sistema de referencia OXYZ solidario a la garra libre. Esto es así debido a que el vector $\Delta \xi$ se ha construido a partir de medidas de los sensores montados sobre la garra libre, obteniendo por tanto

resultados en coordenadas locales relativas a dicha garra. No obstante, normalmente, para cualquier robot, su matriz Jacobiana se suele expresar respecto a los ejes del sistema fijado en la base fija del robot, que en el caso del presente artículo, sería un sistema de referencia solidario a su garra fija (se trataría del sistema de referencia $x_0y_0z_0$ de la Figura 2). Si denotamos por \mathbf{J}_0 la Jacobiana expresada respecto a los ejes de la garra fija del robot, la Jacobiana \mathbf{J}_e se obtendría de la siguiente manera [2]:

$$\mathbf{J}_e(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}^T \end{bmatrix} \cdot \mathbf{J}_0(\mathbf{q}) \quad (6)$$

donde $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\mathbf{q})$ es la matriz de rotación que representa la orientación de la garra libre respecto a la garra fija. En [6] se presentan expresiones explícitas del vector de posición y de la matriz de rotación de la garra libre respecto a la garra fija para el robot HyReCRO, como función de las componentes del vector \mathbf{q} . En cuanto a la Jacobiana \mathbf{J}_0 , ésta se obtiene tomando derivadas parciales de dichas expresiones, completando así el cálculo de \mathbf{J}_e según la Ecuación (6).

Como ya se ha comentado anteriormente, lo importante para conseguir el pegado es que el plano α de la garra libre se vuelva coincidente con el plano β de la superficie donde dicha garra debe ser adherida. Para lograr dicha coincidencia, la traslación a lo largo de los ejes paralelos al plano β es irrelevante (dentro de ciertos límites), así como la rotación alrededor del eje \mathbf{n} , ya que la garra no requiere de ninguna rotación particular para realizar el pegado mientras la garra sea paralela al plano de pegado. Por tanto, se podrían suprimir las filas 1, 3 y 5 del vector $\Delta \xi$ y de la matriz \mathbf{J}_e , aumentando así en tres unidades el grado de redundancia cinemática del robot, pudiendo utilizar esos tres grados de libertad sobrantes para optimizar algún objetivo secundario como minimizar la altura a la que se encuentra el centro de gravedad del robot, minimizando así los momentos gravitatorios que tienden a despegar las garras del robot [7]. Suprimir dichas filas también reduce el tamaño de las matrices a operar y, con ello, los tiempos de ejecución.

El algoritmo de la Figura 4 itera hasta que la norma del vector de diferencia $\Delta \xi$ queda por debajo de un umbral ε pequeño que simboliza el error mínimo permitido de pegado. En ese caso, se considera que se ha completado la aproximación y el algoritmo finaliza.

4 SIMULACIÓN

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo previo a su implementación en el robot real, se ha realizado su simulación con la librería

Robotics Toolbox de Peter Corke para MATLAB [2]. Se ha simulado el pegado de la garra libre a la cara de una columna vertical, partiendo de una posición cercana mostrada en la Figura 6 y dada por $q_0 = [\pi/8, 0.15, \pi/4, 0, -\pi/8, \pi/8, 0.1, -\pi/6]^T$ (ángulos en radianes y traslaciones en m). Para la simulación, se utilizan unos parámetros $k = 0.1$ y $\varepsilon = 0.001$.

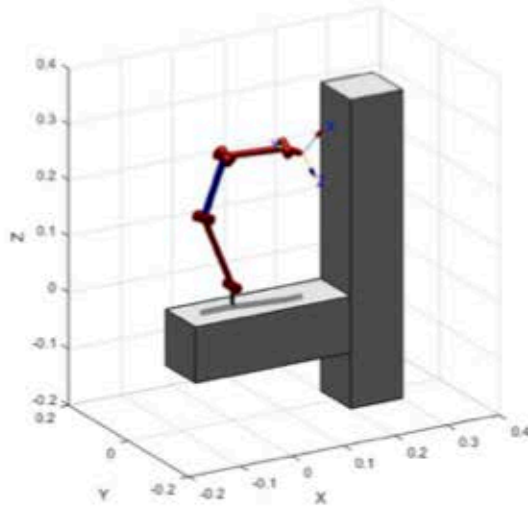


Figura 6: Inicio de la simulación del algoritmo

En la Figura 7 se puede observar cómo se consigue realizar satisfactoriamente el acercamiento de la garra a la superficie de la columna vertical para su posterior pegado. Cabe destacar que, al suprimir las componentes de traslación y rotación prescindibles para el pegado, la posición final de la garra en sus coordenadas X y Z locales y el giro respecto al eje Y son libres. Si esto provocase que la garra terminara apoyándose fuera de la cara de la columna (aunque en su mismo plano) sería necesario incluir restricciones adicionales, o no suprimir las filas 1 y 3 de $\Delta\xi$ y J_e .

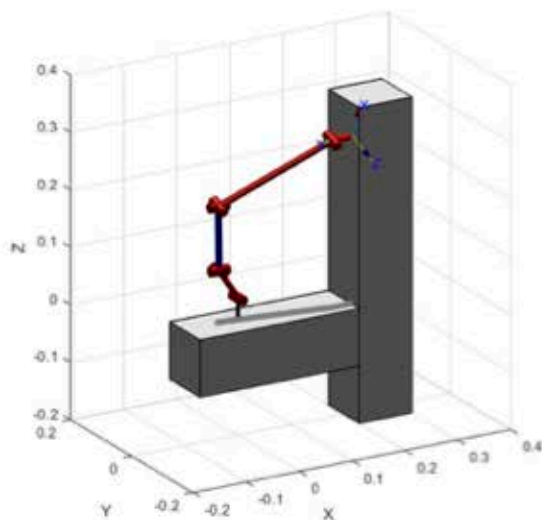


Figura 7: Final de la simulación del algoritmo

5 EXPERIMENTOS REALES

En primer lugar, se ha programado un script de MATLAB que representa gráficamente en tiempo real el plano medido por los tres sensores montados en la garra. En las Figuras 8, 9 y 10 se muestran las representaciones que hace el programa en situaciones diferentes. Cabe recalcar que estas figuras no son simulaciones, sino representaciones en tiempo real a partir de los datos reales tomados por los sensores, obtenidos girando, acercando y alejando manualmente la garra a una superficie. Estas pruebas permitieron verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de identificación del plano de pegado, antes de programar el algoritmo de acercamiento sobre el robot real.

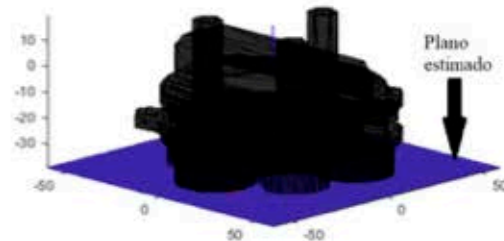


Figura 8: Garra pegada a la superficie

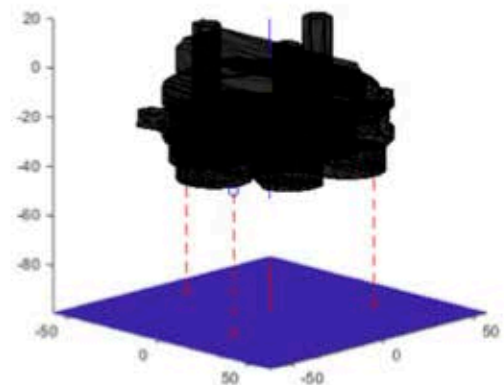


Figura 9: Garra paralela a la superficie

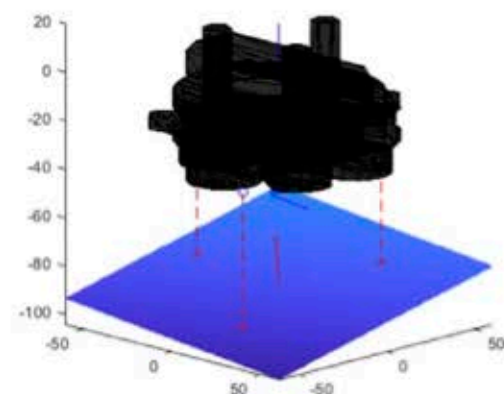


Figura 10: Garra con una orientación arbitraria

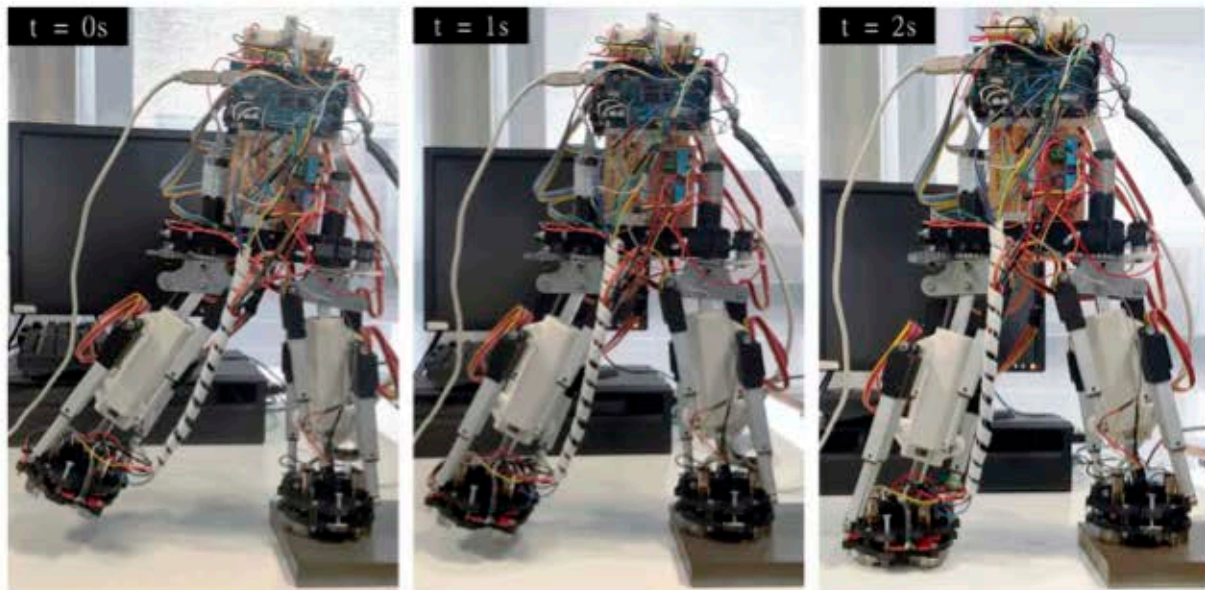


Figura 11: Vista del robot completo durante la aproximación

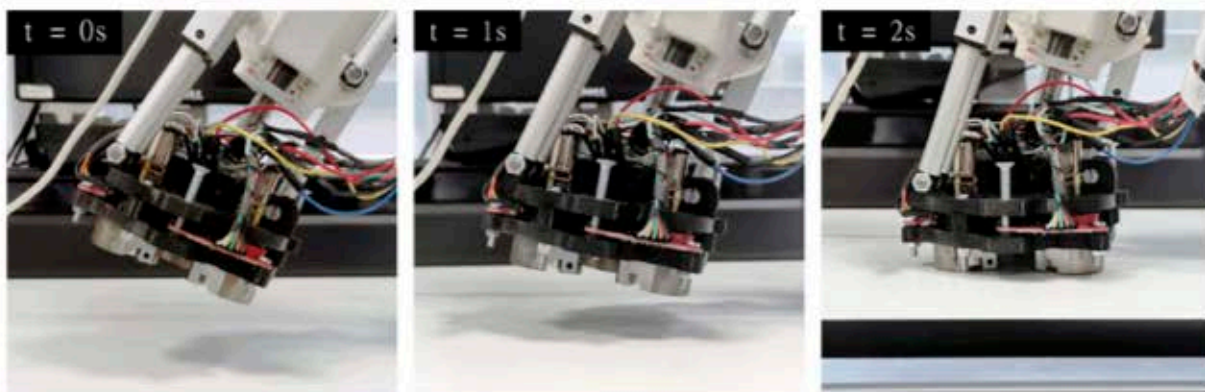


Figura 12: Detalle de la garra durante la aproximación

Finalmente, se ha implementado el algoritmo expuesto sobre un prototipo del robot HyReCRo. En el experimento realizado, se ha llevado la garra de forma manual hasta una posición y orientación próximas a la superficie de pegado, y en ese momento se ha dado la instrucción de inicio del algoritmo. En las Figuras 11 y 12 se muestran tres instantes diferentes del experimento con una vista general del robot y una vista detalle de la garra.

En las Figuras 11 y 12 se aprecia cómo se corrige de forma correcta la posición y orientación de la garra libre respecto a la superficie hasta realizar el pegado. Sin embargo, debido a la redundancia cinemática del robot, que se traduce en una infinidad de soluciones para lograr el acercamiento, el algoritmo no siempre converge a una solución apropiada. Dependiendo de la configuración articular q_0 de la que se parta, la solución a la que converge el algoritmo podría situar la garra libre en una posición demasiado cercana a la

garra fija, aumentando el riesgo de colisión entre ambas garras del robot. Para evitar esto, será necesario incorporar restricciones adicionales al algoritmo iterativo.

6 CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se ha propuesto e implementado un algoritmo que permite automatizar el acercamiento de la garra libre a la superficie de adhesión, para un robot trepador bípedo. El control cinemático de la aproximación se realiza mediante un algoritmo iterativo basado en Jacobiana a partir de la matriz de diferencia, la cual expresa la posición y orientación de la superficie de pegado respecto a la garra libre. Dicha diferencia es calculada mediante los datos obtenidos e interpretados por tres sensores láser de distancia instalados en la garra.

Se ha simulado el correcto funcionamiento del algoritmo y se ha implementado sobre un prototipo real. Además, se ha programado una herramienta que permite la representación gráfica en tiempo real del plano de pegado tal cual es captado por los sensores instalados en la garra.

En cuanto a líneas futuras de trabajo a corto plazo, resultará conveniente añadir restricciones al algoritmo para evitar colisiones de la garra libre con la garra fija y con otros obstáculos del entorno, así como añadir otras tareas secundarias que puedan optimizarse durante el proceso de pegado, aprovechando la redundancia cinemática del robot.

Agradecimientos

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

English summary

AUTOMATIC ADHESION OF THE MAGNETIC GRIPPERS OF A BIPED CLIMBING ROBOT

Abstract

Climbing robots are typically used to carry out inspection and maintenance tasks at difficult-to-access high positions of vertical structures, avoiding having human operators climb to these high positions and risking them to fall. In order to climb these structures, bipedal climbing robots have feet with grippers that alternately detach or adhere to the structure to achieve locomotion. To achieve successful adhesion of these grippers, first it is crucial to position and orient them properly on the surface where they are to be adhered, since poor positioning can cause the robot to remain stressed after adhesion, or it can prevent adhesion completely. This article presents an algorithm to automate the adhesion of the magnetic grippers of a bipedal climbing robot. The proposed algorithm is based on the estimation of the relative pose between the gripper and the surface where it should be adhered, by means of three laser sensors. After estimating the relative pose, a Jacobian inverse kinematics algorithm allows the posture of the robot to be automatically adjusted until the desired adhesion is achieved. The results of the algorithm are illustrated by simulations and real experiments.

Keywords: climbing robot, magnetic adhesion, Jacobian, inverse kinematics, laser sensor.

Referencias

- [1] Almonacid, M., Saltaren, R. J., Aracil, R., & Reinoso, O., (2003) "Motion planning of a climbing parallel robot", *IEEE transactions on robotics and automation*, 19(3), pp. 485-489.
- [2] Corke, P. (2017). *Robotics, Vision and Control*. Springer International Publishing.
- [3] Gu, S., Zhu, H., Lin, X., Tan, J., Ye, W., & Guan, Y., (2022) "Truss member registration for implementing autonomous gripping in biped climbing robots", *Automation in Construction*, 136, pp. 104146.
- [4] Kim, J. H., Lee, J. C., Choi, Y. R., & Lee, S., (2016) "Automatic grasping of a pole climbing robot using a visual camera with laser line beams", In *MATEC web of conferences* (Vol. 42, pp. 03005). EDP Sciences.
- [5] Peidro, A., Gil, A., Marín, J. M., & Reinoso, O., (2015) "Inverse kinematic analysis of a redundant hybrid climbing robot", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(11), pp. 163.
- [6] Peidro, A., Gil, A., Marín, J. M., Berenguer, Y., Payá, L., & Reinoso, O., (2016) "Monte-carlo workspace calculation of a serial-parallel biped robot", In *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*, pp. 157-169. Springer.
- [7] Peidro, A., Tavakoli, M., Marín, J. M., & Reinoso, Ó., (2019) "Design of compact switchable magnetic grippers for the HyReCRO structure-climbing robot", *Mechatronics*, 59, pp. 199-212.
- [8] Qiaoling, D., Yan, L., & Sinan, L., (2019) "Design of a micro pole-climbing robot", *Intl. Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(3), pp. 1729881419852813.
- [9] Schmidt, D., & Berns, K., (2013) "Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—A survey of design aspects and technologies", *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), pp. 1288-1305.
- [10] Tavakoli, M., & Marques, L., (2011) "3DCLIMBER: Climbing and manipulation over 3D structures", *Mechatronics*, 21(1), pp. 48-62.
- [11] Tavakoli, M., Marques, L., & de Almeida, A. T., (2011) "A low-cost approach for self-

calibration of climbing robots”, *Robotica*, 29(1), pp. 23-34.

- [12] Xiao, J., Xi, N., Xiao, J., & Tan, J., (2003) “Multi-sensor referenced gait control of a miniature climbing robot”, In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)* (Vol. 4, pp. 3656-3661).
- [13] Xiao, Z., Wu, W., Wu, J., Zhu, H., Su, M., Li, H., & Guan, Y., (2012) “Gripper self-alignment for autonomous pole-grasping with a biped climbing robot”, In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 181-186.
- [14] Zhu, H., Guan, Y., Wu, W., Zhang, L., Zhou, X., & Zhang, H., (2014) “Autonomous pose detection and alignment of suction modules of a biped wall-climbing robot”, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 20(2), pp. 653-662.



© 2022 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-ncsa/4.0/deed>).