

## ROMERIN: Organismo robótico escalador basado en patas modulares con ventosas activas

Carlos Prados\*, Miguel Hernando, Ernesto Gambao, Alberto Brunete

*\*Centro de Automática y Robótica, CAR UPM-CSIC, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.*

**To cite this article:** Prados, C., Hernando, M., Gambao, E., Brunete, A. 2023. ROMERIN: A climbing robotic organism based on modular legs with active suction cups. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 20, 175-186. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.18749>

### Resumen

Este artículo presenta el robot ROMERIN, un organismo robótico modularmente compuesto por patas que utilizan ventosas activas como sistema de adhesión al entorno, y cuyo objetivo es la inspección de infraestructuras mediante la escalada. Se detalla la estructura física del organismo robótico, incluyendo una explicación de los módulos y del cuerpo. También se incluye una descripción de la arquitectura de control basada en el control en par de la posición del cuerpo del organismo, cuyo número de patas y disposición de las mismas es variable de forma que el sistema es versátil para su utilización en diferentes entornos y aplicaciones. La arquitectura de control que se ha diseñado sirve de base para el control de robots escaladores con patas de cualquier número de patas. Se ha comprobado su funcionamiento en el robot físico ROMERIN y en su gemelo digital (“digital twin”), registrando y mostrando dichos resultados. Además, se ha comprobado el funcionamiento de la arquitectura de control para diferentes configuraciones del organismo, demostrando su modularidad y versatilidad para diferentes aplicaciones.

*Palabras clave:* Cinemática de robots para control, Modelado de robots y sistemas multi-robot para control, Robótica de campo, marina y submarina y aérea.

### ROMERIN: A climbing robotic organism based on modular legs with active suction cups

#### Abstract

This article presents the ROMERIN robot, a modular robotic organism composed of legs that use active suction cups as system of adhesion to the environment, and whose objective is the inspection of infrastructures by means of climbing. The physical structure of the robotic organism is detailed, including an explanation of the modules and the body. It is also included a description of the control architecture, which is focused on the torque-based control of the position of the organism body, whose number of legs and their arrangement is variable, giving the system versatility for use in different environments and applications. The designed control architecture serves as a basis for the control of legged climbing robots with any number of legs. Its performance has been checked on the physical ROMERIN robot and its digital twin, recording and displaying the obtained results. In addition, the performance of the control architecture has been verified for different configurations of the organism, concluding its modularity and versatility for different applications.

*Keywords:* Kinematics of robot for control, Model of robots and multi-robot systems for control, Field, marine, submarine and aerial robotics.

### 1. Introducción

El interés en robots con patas se ha incrementado en los últimos años, a la par que el avance en técnicas de control ha demostrado increíbles resultados. La locomoción basada en pa-

tas resulta poco eficiente respecto a consumo; sin embargo, la flexibilidad y versatilidad que dichos sistemas aportan en entornos complejos, poco o nada estructurados, los hace especialmente interesantes Katz et al. (2008). En escenarios como las infraestructuras civiles, donde el mantenimiento y la inspección

\*Autor para correspondencia: c.prados@upm.es

deben realizarse de forma periódica, este tipo de robots resultan esenciales. Si el robot es capaz no solo de andar, sino de escalar, éste podría llevar a cabo este tipo de tareas en instalaciones como aerogeneradores, centrales nucleares, túneles, torres de refrigeración, o grandes edificaciones Hernando et al. (2019).

Los robots con patas imitan al mundo animal, ya sea a humanos, animales o insectos, como un ejemplo de biomímica lida (2007); Tan et al. (2006). Estos robots cuentan con un alto número de grados de libertad (GDL), y su coordinación y control resulta de gran complejidad a la hora de conseguir los movimientos deseados mientras se garantiza la estabilidad y su seguridad. Los robots con patas escaladores añaden el problema extra de contar con un sistema de adhesión, como ventosas, imanes o pinzas. En este caso, cuando el robot se encuentra adherido al entorno, el sistema es hiper-estático, es decir, su estructura mecánica es estable, pero las ecuaciones de elasticidad no son suficientes para determinar sus fuerzas internas. Con el objetivo de reducir la complejidad del control y aumentar la gama de aplicaciones, en este artículo se propone el concepto de organismo robótico escalador basado en patas, cada una de las cuales se considera un módulo. Se presenta el control en par de la posición del cuerpo del organismo a través, también, de un enfoque modular, de tal manera que cada pata o módulo está controlada directamente por un agente de nivel superior.



Figura 1: El organismo robótico ROMERIN colgado en el techo.

La inspiración de nuestro sistema se encuentra en el mundo de los insectos, donde el cerebro coordina el movimiento de las diferentes extremidades, las cuales tratan independientemente de cooperar en una acción determinada por el conjunto Büschges and Schmidt (2015). Si por el motivo que fuera, el número de extremidades o la funcionalidad de alguna de ellas varía, el insecto se adapta a esta nueva situación sin ningún problema.

En la literatura, un robot modular es aquel capaz de cambiar su forma para adaptarse a diferentes tareas y entornos Yim et al. (2002); Gilpin and Rus (2010). Los robots modulares homogéneos se definen como un sistema compuesto por componentes idénticos, de tal manera que trabajen conjuntamente para conseguir un objetivo dado. Una combinación de varios módulos que conforman un sistema capaz de realizar tareas complejas se suele definir como enjambre, en el caso de que haya una combinación coordinada de unidades modulares, u organismo robótico, en el caso de que se forme un sistema que funciona como un entidad individual. El objetivo de emplear un organismo robótico compuesto por robots más simples es reducir la com-

plejidad ante variaciones estructurales y conceptuales, a la vez que se aumenta la robustez y la capacidad de adaptación Humza et al. (2009). De esta manera, teniendo en mente desarrollar un robot escalador con patas destinado a un gran número de entornos y aplicaciones, en este artículo se propone una arquitectura para el control en par de la posición del cuerpo del organismo, donde el número y disposición de módulos, o patas, es variable. A diferencia de los robots modulares autoconfigurables, cuya forma puede variar dinámicamente durante el tiempo de operación, el robot modular propuesto puede cambiar la morfología únicamente antes de ser utilizado.

Este artículo se centra en la coordinación de los módulos presentados en Hernando et al. (2022). Estos módulos tienen la capacidad de compartir energía, de forma que si la batería de un módulo deja de funcionar por cualquier motivo, el resto de módulos comparten su energía, aumentando la robustez del organismo. La Figura 1 muestra el organismo robótico ROMERIN, compuesto en este caso por cuatro módulos. Se entiende por módulo una máquina programable capaz de realizar una serie de acciones de forma automática, como controlar el movimiento de sus articulaciones, detectar el entorno y reaccionar consecuentemente adhiriéndose al mismo. El concepto de organismo que se presenta se basa en un conjunto variable de módulos, que pueden organizarse de diferentes formas, de tal manera que todos colaboren para lograr un objetivo común. Gracias a este enfoque, existe una variabilidad en la configuración del organismo, lo que trae muchas ventajas. Por ejemplo, un conjunto de muchos módulos podría organizarse alrededor de un sensor complejo y pesado, mientras que un conjunto de pocos módulos podría prepararse para actuar de forma más ligera. Todo el conjunto, la carga útil, el ordenador de control, los sensores y actuadores externos, y los módulos constituirían el organismo robótico. Llevar cargas más o menos pesadas, o formas más o menos complejas, se lograría agregando estratégicamente más módulos al organismo en posiciones determinadas. La dificultad de este enfoque radica en cómo calcular la fuerza/par que tiene que aplicar cada articulación para compensar el peso de todo el organismo.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 de este artículo se hace una revisión del estado del arte de robots con patas, escaladores y modulares. En la sección 3 se describen los módulos de nuestro organismo y del cuerpo que los une. En la sección 4 se detalla el gemelo digital del organismo y su estructura. En la sección 5 se explica la arquitectura de control para el control del organismo, detallando todos sus componentes e indicando los detalles de la implementación en la sección 6. La sección 7 se dedica a definir el control en par utilizado. Finalmente, se incluyen los resultados y las conclusiones en las secciones 8 y 9 respectivamente.

## 2. Estado del arte

La mayoría de robots con patas tiene un control de alto y bajo nivel centralizado, es decir, hay un ordenador central (OC) encargado del control y del manejo de entradas y salidas. Robots como ANYmal Hutter et al. (2016), StarlETH Hutter et al. (2012), o Spot son el resultado de los avances en las tecnologías de control y mecatrónicas que han permitido el paso de prototipos a máquinas empleadas en aplicaciones de uso en

tiempo real. Estos robots cuadrúpedos han sido diseñados para lidiar con terrenos accidentados. Para ello cuentan con tres GDL por pata, movidos por fuertes motores que permiten movimientos explosivos para una rápida respuesta ante contingencias. Añadiendo más GDL se aumenta la maniobrabilidad, la adaptabilidad al terreno y la estabilidad, resultando en robots como BigDog Raibert et al. (2008) o LAURON V Roennau et al. (2014), aunque su control resulta ser más complejo. La mayor parte de robots con patas utilizan sensores de fuerza/par en lugares cercanos al punto de contacto, de tal manera que obtienen de manera directa los valores de las fuerzas reactivas que aparecen en cada pata.

Respecto a robots escaladores, se puede encontrar una gran variación de tipos, no solo aquellos que se asemejan a insectos u otros animales. Así por ejemplo, en Kim et al. (2008) los autores presentan una locomoción continua de alta velocidad mediante una cadena de 24 ventosas situadas sobre dos ruedas tipo oruga. De manera similar, en Baghani et al. (2005) se propone un robot para escalar pilares y tubos verticales usando ruedas concéntricas que ejercen fuerza sobre el interior del tubo. Por otro lado, el robot OmniClimbers Tavakoli et al. (2013) utiliza ruedas omnidireccionales, al igual que muchas de las plataformas robóticas que persiguen la versatilidad y maniobrabilidad de los vehículos holonómicos Prados et al. (2021) para la inspección de infraestructuras ferromagnéticas planas y convexas utilizando imanes. En Alkalla et al. (2017) los autores presentan un robot escalador para la inspección de embarcaciones industriales que utiliza dos hélices coaxiales invertidas (que giran en direcciones opuestas para cancelar los momentos de arrastre) montadas en un robot móvil de cuatro ruedas.

El uso de patas en robots escaladores implica introducir variaciones con respecto a los robots que únicamente caminan. En este caso no bastaría con añadir un sistema de adhesión en cada una de las patas, sino que haría falta un cambio en la cinemática y disposición de las patas. Entre otras cosas, el cuerpo debe mantenerse lo más cerca posible de la superficie para reducir el estrés en los puntos de agarre. Un ejemplo es el robot SCALER Tanaka et al. (2022), el cual es un robot cuadrúpedo con cuatro GDLs por pata que muestra capacidades de escalada en rocódromos, descuelgues, y techos, a la vez que es capaz de trotar en el suelo. Su principal inconveniente es que no es capaz de escalar superficies lisas o rugosas que no dispongan de un punto claro de agarre. Para reducir el riesgo de volcar, las patas están prácticamente situadas en el plano del cuerpo, el cual presenta una cadera motorizada para mejorar la flexibilidad y velocidad del robot. Por otro lado, robots como Lemmur IIB Kennedy et al. (2006) o REST Grieco et al. (1998) son capaces de escalar paredes de cualquier inclinación, mientras que tienen complicaciones para cambiar de plano y escalar áreas lisas, al igual que SCALER. Generalmente, el principal problema de los robots escaladores es el cambio entre planos, ya sea debido a su diseño mecánico o conceptual, limitando su uso a un pequeño nicho de aplicaciones. El robot Rvc Peters et al. (2010) incluye un nuevo DOF en el cuerpo para lidiar con este problema, pero se limita a planos cercanos. Otro ejemplo es el robot cuadrúpedo Magneto Bandyopadhyay et al. (2018), el cual no consigue el cambio de plano hasta el momento, pero demuestra buenos resultados a la hora de atravesar agujeros de hasta 23 cm mediante el uso de tres GDLs por pata.

Respecto a los robots modulares, éstos aportan en general gran versatilidad gracias a que son reconfigurables y rápidos de construir, mantener y sustituir. Sin embargo, su adaptabilidad a las diferentes aplicaciones agrega complejidad de control debido a la necesidad de generalización. A medida que el número de módulos crece, la complejidad aumenta inexorablemente Yim et al. (2002). Por ejemplo, Roombots se presenta como un conjunto de módulos que permiten la locomoción como si de un vehículo se tratara, así como mecanismos de conexión activa para la reconfiguración del tiempo de ejecución Sprowitz et al. (2010). La coordinación de los módulos se realiza mediante redes neuronales CPG (generadores de patrones centrales) que producen patrones coordinados de actividad rítmica sin ninguna entrada de retroalimentación sensorial Spröwitz et al. (2014).

Las patas modulares para robots son una buena opción para aquellos sistemas cuya aplicación puede variar según las necesidades. Estos sistemas intentan imitar a la naturaleza, que ha desarrollado una extraordinaria robustez a través de la redundancia y de la rápida adaptación. WalkingBot Wang et al. (2020) es un robot interactivo modular con patas cuya configuración se detecta dinámicamente. Demuestra un correcto comportamiento con diferentes distribución de patas, como configuraciones cuadrúpedas o hexápodos. De igual forma, ROMHEX Hernando et al. (2021a), que es la versión previa no modular de ROMERIN, demuestra robustez frente a la pérdida de varias patas, además de hacer una optimización previa de la posición inicial en la que deben colocarse las patas para maximizar la longitud del patrón de movimiento. Desai et al. presentan en Desai et al. (2018) un diseño interactivo de un robot andante y una optimización automática del diseño, a la vez que presentan el control de la posición del cuerpo. De la misma manera, Megaro et al. presentan un diseño interactivo con el mismo objetivo Megaro et al. (2015) para diferentes configuraciones y topologías. En esta búsqueda de robustez a través de la redundancia y la rápida adaptación de la naturaleza, en Buettner et al. (2018) los autores presentan cómo se debe diseñar una pata robótica modular para abordar el mantenimiento y la navegación en entornos estructurados. De manera similar, en Buettner et al. (2019); Desai et al. (2018) se presentan las ideas básicas para crear las patas de un robot modular.

Por último, el sistema de adhesión está directamente relacionados con la aplicación donde se pretende utilizar los robots escaladores con patas Schmidt and Berns (2013). Un sistema usual es la adhesión mediante fuerza magnética o electromagnética, de tal manera que este tipo de robots son utilizados para la inspección, mantenimiento y labores de construcción en entornos industriales de materiales ferromagnéticos. En KamaGaluh et al. (2012), los autores presentan el diseño mecánico de un robot cuadrúpedo con adhesión magnética, mientras que en Bandyopadhyay et al. (2018), los autores presentan a Magneto, el cual tiene similitudes con ROMERIN en cuanto a su cinemática. Otro ejemplo es el robot HyReCRo Peidró et al. (2019), el cual es un robot bípedo para la escalada de estructuras de acero. La peculiaridad de este sistema pasa por la disponibilidad de tres pares de imanes conmutables que, dependiendo de su orientación relativa con su pareja, pueden adherirse o soltarse de los substratos metálicos. Por otro lado, la adhesión mecánica está basada en pinzas y su rango queda muy limitado

debido a los entornos a los que están enfocados. Entre otros, ROMA I Kennedy et al. (2006) y LIBRA Longo and Muscato (2006) utilizan este tipo de adhesión. Respecto a los robots enfocados para entornos como infraestructuras arquitectónicas, la adhesión neumática resulta ser la más atractiva por su versatilidad. Dentro de este grupo encontramos aquellos que utilizan ventosas de succión pasivas Yoshida and Ma (2010); Ge et al. (2016), cámaras de vacío, como Alicia 3 Longo and Muscato (2006) o los presentados en Bisht et al. (2022); Eto and Asada (2020), y succión por generación continua de presión negativa mediante turbinas, como ROMHEX Hernando et al. (2021a) o el presentado en Andrikopoulos et al. (2019). El último sistema de succión es el elegido para nuestro organismo gracias a que son sistemas compactos, versátiles, sencillos, adaptables y apropiados para entornos variables. Finalmente, en los últimos años han surgido nuevos mecanismo de adhesión como los sistemas de agarre bio-inspirados, enfocados para entornos donde los sistemas anteriormente descritos resultan poco eficaces.

### 3. Organismo robótico escalador con patas ROMERIN

A lo largo de esta sección se describen los módulos propuestos, así como las principales características y requisitos que debe cumplir el cuerpo del organismo. A su vez, se propone un organismo con el que se realizan las pruebas para poder validar la arquitectura de control que se presenta más adelante.

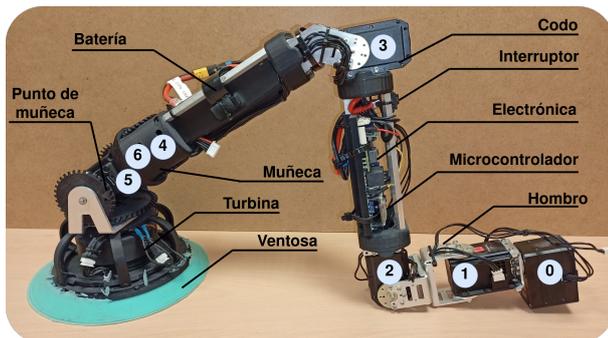


Figura 2: Módulo del organismo.

#### 3.1. Descripción de los módulos

Como módulo del organismo robótico (Figura 2) se propone una cadena de 7 GDL que utilizan servomotores de Dynamixel (los cuales tienen un microcontrolador integrado). El primer GDL se utiliza para facilitar el cambio de plano en situaciones complejas, mientras que el resto se encargan de situar y colocar la ventosa frente a una superficie del entorno. Disponer de más de 6 GDL nos permite elegir la configuración más apropiada en cada momento, pudiendo optimizar los pares que aparecen en las articulaciones, y de esta manera reducir el consumo y garantizar la seguridad del conjunto. Los motores se agrupan por hombro (0, 1 y 2), codo (3) y muñeca (4, 5 y 6). La muñeca cuenta con un mecanismo diferencial, además de que los ejes de los tres motores se cortan en un punto denominado punto de la muñeca (PM), de tal manera que cuando la ventosa se adhiere a una superficie dicho punto queda fijo independientemente de la posición de cada uno de los motores de la muñeca.

Cada módulo, cuyo peso es de 1.94 kg y longitud de 0.86 m, tiene su propia batería (LiPo 4S 3700 mAh, 45C), situada entre

la articulación 3 y 4. Como actuador se encuentra la denominada ventosa que funciona por medio de generación de vacío gracias a un motor de corriente continua de tres fases, encargado de generar una presión negativa en el interior de la ventosa. En la cara interior de la ventosa (Figura 3) se han dispuesto tres sensores láser de distancia desfasados  $120^\circ$  unos de otros, cuya utilización permite un correcto enfoque de la ventosa contra la superficie de contacto. Además, se ha incluido un sensor de presión y temperatura que será usado para la estimación de fuerza de contacto Hernando et al. (2021b). Todo ello, junto al controlador del motor, se encuentra en la corona circular.

Tabla 1: Mensajes enviados entre los módulos y el ordenador central ("master").

Mensaje	Información enviada	Sentido
Info. motor	Id, posición, velocidad, intensidad, temperatura, voltaje, estado	MCU a OC
Info. módulo	Nombre, info. red	
Info. analógica	Voltaje batería, intensidad	
Comando motor	Id, posición, velocidad, torque (ON/OFF), reboot	OC a MCU
Solicita info.	Sin información asociada	
Comando ventosa	Potencia turbina (%)	
Solicita master	Sin información asociada	



Figura 3: Ventosa de uno de los módulos donde se observa su corona circular. En rojo se muestra el driver que mueve el motor de la turbina, en azul se detallan los sensores láser de distancia, y en amarillo el sensor de presión y temperatura. La ventosa está impresa íntegramente en plástico, coexistiendo plástico de gran robustez mecánica con plástico flexible para la adaptación de la ventosa a superficies rugosas.

El control y lectura, tanto de los servomotores como de la actuación de la turbina y los sensores de la ventosa, está implementado en el microcontrolador (MCU) ESP32, localizado en la placa electrónica (entre las articulaciones 2 y 3). Los motores están conectados vía half-duplex UART (bus TTL) y cada uno de ellos tiene un identificador único, como se muestra en la Figura 2. Los tipos de mensaje que se pueden enviar entre el módulo y el ordenador central (OC) se muestran en la Tabla 1.

#### 3.2. Descripción del cuerpo del organismo

Cada módulo se puede comunicar con otros dispositivos de manera inalámbrica (Bluetooth y WiFi) o por cable (bus CAN). Por conveniencia, y siendo indiferente el medio de transmisión, actualmente la comunicación se realiza a través de WiFi usando mensajes UDP (User Datagram Protocol). La comunicación vía

Bluetooth se ha reservado para la configuración de parámetros. Para ello, se ha definido un protocolo de comunicación propio, de tal manera que cuando dicho módulo se encuentra enlazado a un dispositivo “master” (como pudiera ser el OC), este envía información acerca de su propio estado con una frecuencia de 30Hz. Para saber si el “master” se encuentra activo, este debe emitir periódicamente una señal a los módulos que controla (“heart beat”). La Tabla 1 indica los mensajes con los que se comunican el OC y cada uno de los MCU.



Figura 4: Cuerpo que aloja 4 módulos y todos los componentes necesarios para el compute.

Como se ha indicado, el organismo no tiene un número concreto de módulos, y su disposición no está estrictamente definida, quedando como responsabilidad del desarrollador el correcto diseño de un cuerpo para desarrollar la tarea que se desee. Por tanto, definimos el cuerpo como aquel conjunto de dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos que cumplan las siguientes pautas:

- Alberga el OC encargado de la coordinación de los módulos y el control del organismo en su conjunto.
- Tiene alojamiento físico para los módulos.
- Alberga un router WiFi a través del cual se realiza la comunicación por medio de una red local. Debe situarse de tal manera que la señal sea suficientemente buena para el OC y los módulos.
- Sensores exteroceptivos, como pudiera ser una cámara RGBd, para percibir el entorno.
- Tiene un acelerómetro que determina la dirección y el sentido de la gravedad.

Como ejemplo de organismo robótico, y para la realización de las pruebas, en este trabajo se presenta un cuerpo con capacidad de albergar 4 módulos desfasados 90° mediante la sujeción de dos planchas de aluminio en la parte superior e inferior (Figura 4). Como OC, se hace uso de la “Jetson Xavier NX Developer Kit”, 8 GB, CPU of 6-core NVIDIA Carmel ARM, 384

NVIDIA CUDA cores y 48 Tensor cores”. Para generar la red local se usa un “Vonets VAR11N mini router”, mientras que la cámara de RealSense “Depth Camera D435i” con IMU integrada se usa para percibir el entorno, contando para su movimiento con un sistema pantilt. Dicho mecanismo está gobernado por motores de Dynamixel “XL330-M2888-T” controlados por el OC por medio de convertidor de comunicación “U2D2” conectado por USB. Por último, un convertidor CC-CC transforma la tensión de la batería del cuerpo de 14.8 V que alimenta el OC, que iría alojada bajo la plancha inferior, a una tensión de 5V usada por los motores del sistema pantilt.

#### 4. Gemelo digital (digital twin)

La creación de entornos virtuales es una herramienta crucial para el correcto diseño y depurado de sistemas de control. Permiten realizar pruebas sin poner en peligro los sistemas físicos, reduciendo costes y tiempos de desarrollo, cambiando condiciones del entorno de una manera más rápida.

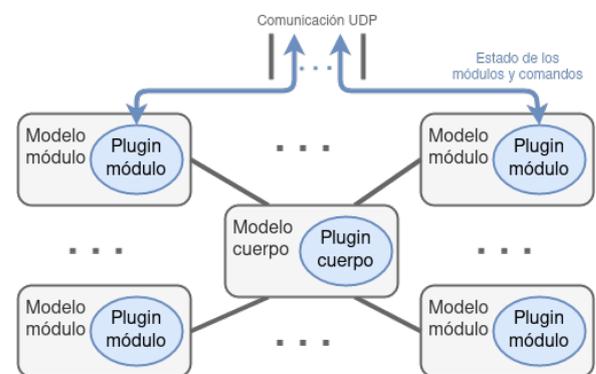


Figura 5: Estructura del gemelo digital del organismo robótico.

En este artículo, se propone el uso del simulador robótico Gazebo para la creación de un gemelo digital y un espejo digital del organismo robótico físico. El primero de ellos se utiliza para el testeado de algoritmos de control, mientras que el segundo sirve para comprobar problemas de funcionamiento (vídeo disponible en <https://youtu.be/5-jJpLUR-I>). Para ello se propone la estructura mostrada en la Figura 5, donde se observan una serie de modelos del módulo y un modelo del cuerpo que describen físicamente al módulo y al cuerpo respectivamente a la vez que incluyen todos sus elementos, como son los motores, sensores, ventosas o baterías. Cada modelo tiene asociado un “plugin” que es el encargado de replicar el comportamiento de cualesquiera que sea el sistema. Por ejemplo, el “plugin” de un módulo envía periódicamente su estado, responde ante mensajes recibidos vía UDP, y maneja la ventosa y los motores que incluye. Por otra parte, el “plugin del cuerpo” maneja la posición de la pantilt y lee los datos aportados por la cámara de profundidad.

#### 5. Arquitectura de control

Entre las principales arquitecturas de control de robots con patas encontramos Free Gait Fankhauser et al. (2016), capaz de ejecutar movimientos del cuerpo de los robots ANYmal y

StarlETH, ORCA Maehle et al. (2011), la cual permite al robot hexapodo OSCAR Jakimovski et al. (2009) manejar su auto-organización, auto-reconfiguración y autocuración, y LAURON V Roennau et al. (2014), un sistema de control basado en comportamientos para controlar el robot con el mismo nombre. En Sombolstan et al. (2021), los autores presentan una arquitectura para el control en par del robot Unitree A1. De igual forma, en Tanaka et al. (2022) se presenta el control en posición y velocidad al robot escalador SCALER, mientras que en Bandyopadhyay et al. (2018) se incluye el control de los motores y del sistema de adhesión del escalador Magneto. Sin embargo, para todas estas arquitecturas el número y disposición de sus componentes está previamente definido, además de implementar un control centralizado llevado a cabo por el OC.

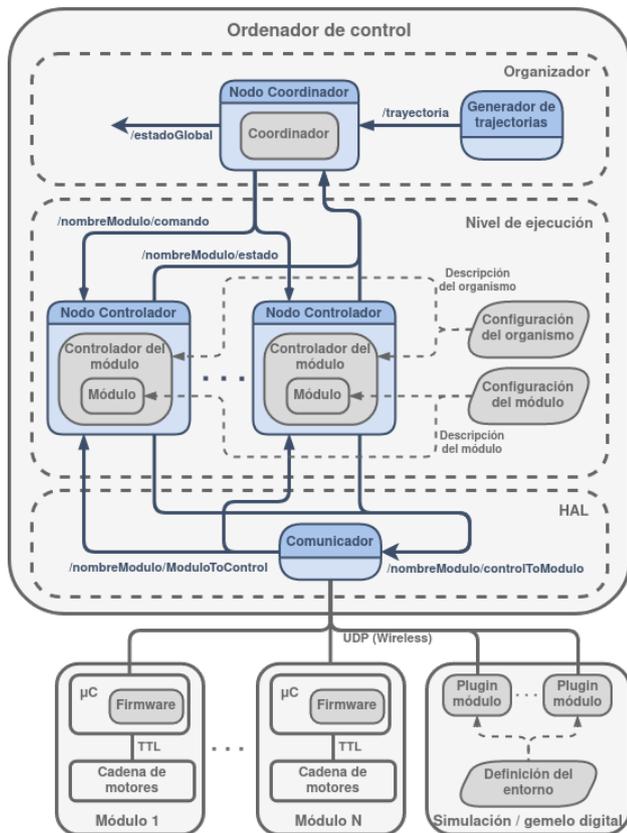


Figura 6: Arquitectura de control para organismos robóticos como los definidos en el artículo. Los cuadros grises representan dispositivos hardware, mientras que los discontinuos son niveles de la arquitectura. Los cuadrados oscuros son clases de C++, es decir, objetos. Los paralelogramos son, por su parte, archivos de configuración que definen parámetros del robot, información de comunicación y datos importante para el control. Los contenedores azules son nodos de ROS2 que hacen uso de objetos para la ejecución de una rutina. Las líneas grises representan comunicación entre dispositivos, las azules son "topics" de ROS2 (desde publicador a subscriber), y los discontinuos representan el uso de un recurso.

En este artículo se presenta una arquitectura que sirve de base para el control de la posición del cuerpo de organismos robóticos modulares escaladores con patas de cualquier morfología, siendo posible añadir más componentes al framework para mejorar el comportamiento del organismo. La arquitectura presentada persigue el objetivo de imitar al mundo animal, donde los individuos realizan movimientos del cuerpo sin tener en cuenta la posición de cada una de las patas. La arquitectu-

ra está implementada en C++ y hace uso de las herramientas de comunicación que ROS2 ofrece para compartir información entre sus componentes (Figura 6).

En la parte inferior izquierda de la imagen se encuentran  $N$  módulos físicos (sección 3.1), mientras que en la parte derecha se encuentra el sistema simulado (sección 4). Indistintamente, el OC se comunica por UDP con ambas partes, ya que el sistema simulado es una realización virtual del organismo, es decir, que ambos presentan la misma interfaz de comunicación.

El OC es el corazón de la arquitectura de control, y se divide en los siguientes niveles: el nivel de abstracción de hardware, el nivel de ejecución y el organizador.

### 5.1. Nivel de abstracción de hardware

De sus siglas en inglés, HAL, Hardware Abstraction Layer Murray IV et al. (2005), es la capa que se encarga de ocultar cómo se desarrolla la comunicación entre los niveles superiores y los módulos. Para ello, su único componente, el "Comunicador", recibe las direcciones IP y puertos de origen y destino, así como la información a transferir. De esta manera, es posible comunicarse indistintamente con los módulos reales y el gemelo digital.

Si los mensajes llegan desde un nivel superior, éstos especifican un comando a realizar por un módulo. Estos mensajes se reciben a través del topic de ROS2 con nombre `/nombreMódulo/controlToModulo`, y se redirigen al módulo especificado. Por el contrario, si los mensajes provienen de la parte inferior, éstos especifican el estado de un módulo. Estos mensajes se redireccionan al topic `/nombreMódulo/moduloToControl` para ser enviados al controlador necesario.

### 5.2. Nivel de ejecución

El nivel de ejecución contiene los componentes que controlan los módulos a un nivel más alto. Está formado por  $N$  "Nodos del Controlador" creados dinámicamente de acuerdo con la configuración del organismo. Cada nodo contiene un "Controlador del Módulo", responsable de determinar la posición que debe adoptar cada uno de los módulos dada una posición objetivo del cuerpo. Cada controlador incluye un objeto "Módulo" que controla los componentes de un módulo dado, es decir, sus actuadores y sensores, incluyendo la gestión de la ventosa, al igual que la cinemática directa e inversa y la dinámica. A su vez, implementa el manejo de trayectorias desde un punto a otro de un módulo, ya sean lineares o libres.

El "Controlador del Módulo" lee del archivo de configuración *Configuración del Organismo*, el cual detalla los módulos disponibles, su posición respecto al centro del robot, su dirección IP y su puerto de comunicación. Por otra parte, el "Módulo" lee información del archivo *Configuración del Módulo* que detalla los parámetros cinemáticos y dinámicos, los límites de posición, velocidad y aceleración de las articulaciones y del efector final (TCP de sus siglas en inglés), y parámetros para el cálculo de la cinemática inversa.

Cada "Controlador del Módulo" envía el estado del módulo asociado (denominado *Estado Local*) al nivel inmediatamente superior para su tratamiento a través del topic `/nombreMódulo/estado` cuya información viene detallada en la Tabla 2. A su vez, el controlador recibe comandos para su ejecución a través del topic `/nombreMódulo/comando`.

### 5.3. Organizador

El organizador es el responsable de generar las trayectorias basándose en los comandos del usuario y, consecuentemente, decidiendo la secuencia más apropiada de movimientos del cuerpo. El "Nodo de Generación de Trayectorias" genera un perfil de velocidad según los datos introducidos por el usuario. Dado dicho perfil, el "Nodo Coordinador" envía comandos a los niveles inferiores de la posición del cuerpo, gracias a los cálculos realizados por el "Coordinador" que hace un seguimiento de la trayectoria basándose en la odometría.

Tabla 2: Mensajes enviados entre capas de la arquitectura.

Mensaje	Información
Estado local	Nombre e identificador
	Posición del efector final (TCP de sus siglas en inglés)
	CoM del módulo
	Posición estimada del cuerpo
	Estado del módulo: nivel de batería, estado de los motores, potencia de la turbina, fuerza en la adhesión
Comando	Posición objetivo del cuerpo
	Turno, o no, del módulo para dar un paso (junto posición de destino)

## 6. Tipos de movimientos de los módulos

En esta sección se detallan diferentes modos de movimiento de los módulos, tanto para cuando están adheridos o en tiempo de vuelo.

### 6.1. Movimiento de un módulo en el espacio articular

Siendo siete el número de GDL del robot, una trayectoria en el espacio articular está definida por  $q(t) \in \mathbb{R}^7$ . Este tipo de movimiento se utiliza cuando el módulo no está en contacto con ninguna superficie, es decir, no soporta ningún peso. La trayectoria queda definida por un vector de posiciones, velocidades y aceleraciones de las articulaciones, y puede especificarse por completo o crearse a partir de puntos de referencia. La implementación se encuentra en el objeto Módulo, donde la duración del movimiento se calcula en función, por una parte, del estado actual y deseado de las articulaciones y, por otra parte, por la velocidad y aceleración máximas de cada una de las articulaciones (definido en la Configuración del Módulo).

### 6.2. Movimiento de un módulo en el espacio cartesiano

Las articulaciones de los módulos que no soportan peso también se pueden controlar mediante comandos de movimiento en el espacio cartesiano  $\mathbb{R}^3$  SO(3). En este caso, se generan las posiciones, velocidades y la aceleración del TCP de cada módulo. Las características son similares al movimiento anterior, pero, en este caso, se definen la velocidad y aceleración máximas de TCP. La cinemática inversa se incluye en el objeto Módulo a través del algoritmo track-IK, un optimizador no lineal de la jacobiana inversa. Debido a la redundancia del problema, puesto que hay más articulaciones que GDL que controlar, la primera articulación se considera fija para movimientos en los que el módulo no cambie de plano.

### 6.3. Movimiento del cuerpo en el espacio cartesiano

Este movimiento determina la posición del punto central del cuerpo en el espacio cartesiano  $\mathbb{R}^3$  SO(3). Debido a que el organismo es hiper-estático cuando las ventosas están en activo, el sistema está sobrerrestringido, por lo que pequeños errores en la estimación de la posición del TCP (debido a las holguras mecánicas y desajustes) conducen a que los motores se sobrecarguen. Una buena forma de mitigar este problema consiste en desactivar los motores de la muñeca durante la ejecución de la trayectoria. De esta manera se evitan la aparición de pares en el PM, y se permite la libre orientación de la ventosa contra la superficie de acople. Aún así, debido a la hiper-estaticidad del sistema se requiere de la implementación de un control basado en par (sección 7). Por ello, en este tipo de movimiento se ignoran las articulaciones de la muñeca, calculándose la posición, velocidad y aceleración respecto al PM.

## 7. Control en par de sistemas articulados hiper-estáticos

El control de sistemas robóticos multicuerpo puede ser controlado mediante dos tipos de controladores. Aquellos basados en la cinemática inversa ("inverse kinematics controllers", IKC) y aquellos basados en la dinámica inversa ("inverse dynamics controllers", IDC). Los primeros generan comandos de velocidad para las articulaciones, mientras que los segundos producen pares. A pesar de que los IKC se siguen utilizando en robótica Tanaka et al. (2022); Qiaoling et al. (2019), los IDC son más recomendables para controlar robots con patas Kim et al. (2019); Bellicoso et al. (2016); Herzog et al. (2016). Para el control de cada uno de los módulos de los robots como los propuestos en este artículo se pueden distinguir dos situaciones según el estado del módulo en particular:

- Cuando el módulo está adherido al entorno. En este caso, la acción de la gravedad queda reflejada en las fuerzas de reacción que aparecen y el módulo debe ser controlado mediante un IDC.
- Cuando el módulo no está adherido y está libre. En este caso no aparecen fuerzas de reacción en el módulo y, por lo tanto, se puede controlar el módulo con un IKC (según se indica en las secciones 6.1 y 6.2), o mediante un IDC (aplicando las ecuaciones dinámicas de un robot manipulador según la ecuación 1).

Los IDC pasan por la obtención del modelo dinámico del robot, según se describe en (1), donde  $M(q)$  es la matriz de inercias,  $C(q, \dot{q})$  la de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $g(q)$  la componente gravitatoria, y el último término denota el vector de fuerza y momento ejercido por el efector final sobre el entorno. El modelo de robots con patas se puede formular como una base flotante al cual se le añaden articulaciones en posiciones específicas.

$$\tau = M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + g(q) + J(q)^T \cdot F_{ext} \quad (1)$$

Para la primera de las situaciones propuestas, cada módulo del organismo tiene una velocidad y aceleración muy pequeñas debido, entre otras cosas, a las limitaciones temporales que impone el acople y desacople de las ventosas. Por esta razón, los dos primeros términos de (1) se pueden despreciar respecto a la

componente gravitatoria. La simplificación del problema concluye en el modelo estático del sistema, donde únicamente aparecen las fuerzas producidas por la acción de la gravedad y las fuerzas de reacción. El resultado son los pares que hay que aplicar en cada articulación para compensar el peso del organismo.

### 7.1. Estimación de las fuerzas de reacción

Como consecuencia del peso de los componentes del organismo aparecen fuerzas de reacción cuando éste se encuentra adherido al entorno. Al contrario que los robots del estado del arte, en este artículo se propone el cálculo de una estimación de las fuerzas reactivas. Además de una reducción de la complejidad mecánica del sistema, se reduce considerablemente el coste de fabricación. Para el cálculo de las fuerzas reactivas es necesario considerar cierta elasticidad en las patas y motores del organismo, lo que resultaría en un sistema demasiado complejo para poder ser utilizado en el ciclo de control online. La solución es utilizar un modelo simplificado lo suficientemente realista. Las hipótesis de simplificación asumidas son las siguientes:

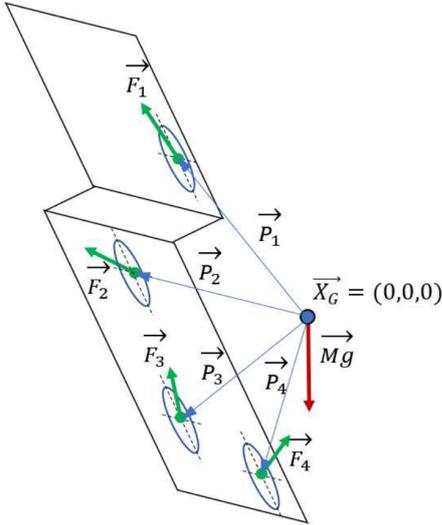


Figura 7: Representación de las fuerzas producidas en las ventosas cuando el robot se encuentra adherido al entorno. Imagen cedida por Hernando et al. (2019).

- Las patas de los robots se consideran rígidas sin capacidad de deformación.
- En las ventosas, dado que se unen a la pata con una junta universal, sólo se producen fuerzas reactivas y no pares.
- Para resolver el sistema hiper-estático se asume que todos los puntos de contacto son elásticos con constante  $K$ .

Con estas suposiciones, se logra obtener una aproximación la distribución de fuerzas en las patas más simple (figura 7). En el caso de ausencia de fuerzas externas, el centro de gravedad del robot está colocado en el punto  $\vec{X}_G$  inicialmente cero.

Como consecuencia de la gravedad y las fuerzas reactivas en los puntos de contacto, el centro de gravedad se mueve y rota como  ${}^0T_R = ({}^0R_R, {}^0\vec{R}_R)$ , donde  ${}^0R_R \in SO(3)$  y  ${}^0\vec{R}_R \in \mathbb{R}^3$  son la matriz de orientación y el vector de posición del centro de gravedad respecto del inicial. Con estas premisas, para que el

sistema sea estable, las ecuaciones de equilibrio estático deben cumplirse (2)). Aplicando el método de Newton sobre el sistema no lineal resultante da como resultado las fuerzas de reacción que aparecen en los puntos de adhesión Hernando et al. (2019).

$$\sum \vec{F}_i + M \cdot \vec{g} = 0 \quad ; \quad \sum \vec{\tau}_i = 0 \quad (2)$$

Siguiendo las hipótesis propuestas a las ecuaciones de equilibrio de momentos, y simplificando, se obtiene:

$$\sum \vec{F}_i \times ({}^0R_R \vec{P}_i) = 0 \quad (3)$$

$$\sum K \left( (I - {}^0R_R) \vec{P}_i - {}^0\vec{P}_R \right) \times ({}^0R_R \vec{P}_i) = 0 \quad (4)$$

$$\sum K (\vec{P}_i - {}^0T_R \vec{P}_i) \times ({}^0R_R \vec{P}_i) = 0 \quad (5)$$

por lo tanto, parametrizando  ${}^0T_R$  con el vector de localización espacial del desplazamiento y la rotación del centro de gravedad  $\vec{x} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ , se obtiene un sistema de seis ecuaciones no lineales con seis incógnitas. Expresando el sistema no lineal como una matriz con su correspondiente vector y aplicando el método de Newton se obtiene la siguiente ecuación:

$$\vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k+1)} - J(\vec{x}^{(k+1)})^{-1} \cdot F(\vec{x}^{(k+1)}) \quad (6)$$

donde  $F : \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^6$  es la función que va de  $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$  y  $(\sum F_x, \sum F_y, \sum F_z, \sum \tau_x, \sum \tau_y, \sum \tau_z)$ , y  $J(x)$  es la matriz jacobiana de  $F$ .

### 7.2. Cálculo de los pares para la compensación de gravedad del organismo

De una manera general, se supone un organismo de  $N$  módulos idénticos, donde el módulo  $i$  tiene  $J$  articulaciones y  $K$  eslabones indicados como  $j \in [0, \dots, J-1]$  y  $k \in [0, \dots, K-1]$ . Se denomina  $m_{ik}$  a la masa del eslabón  $k$  del módulo  $i$ , siendo  $m_i$  el peso total de cada módulo. Una situación habitual es aquella en la que todos los módulos del organismo están correctamente adheridos al entorno mediante un sistema de agarre, como ventosas o imanes, teniendo una articulación libre de tipo rótula ubicada en el PM y que permite la libre orientación del efector final contra la superficie. El cuerpo tiene unas dimensiones dadas y constantes, y una masa de  $m_C$ , mientras que los ángulos de las articulaciones se denotan como  $q_{ij}$ . Los sistemas de referencia (figura 8) están ubicados en el origen del cuerpo  $\Sigma_C$  (situado en el centro de masas, CdM, por decisión de los autores), en el CdM de cada eslabón  $\Sigma_{ik}$ , de cada módulo  $\Sigma_i$  y del organismo entero  $\Sigma_{cg}$ , y en el PM  $\Sigma_{iM}$ . Debido a la interacción del sistema de agarre con el entorno, aparecen fuerzas de reacción,  $F_i$ , en el punto de contacto  $\Sigma_{iV}$ . La matriz de transformación homogénea entre los sistemas de referencia  $\Sigma_C$  y  $\Sigma_{i0}$  se denota como  ${}^C T_{i0}$ .

Tal organismo tiene  $N \cdot J$  GDLs activos, de los cuales  $N \cdot 3$  se fuerzan a ser pasivos (muñecas), mientras que solo se pueden controlar 6 GDLs ( $\mathbb{R}^3 SO(3)$ ). El sistema es hiper-estático en el momento que, cuando el sistema de agarre está adherido al entorno, existen más GDLs para actuar que GDLs para controlar. A medida que aumenta esta diferencia, el sistema se vuelve más complejo y se penalizan más los errores en la estimación de los pares a aplicar.

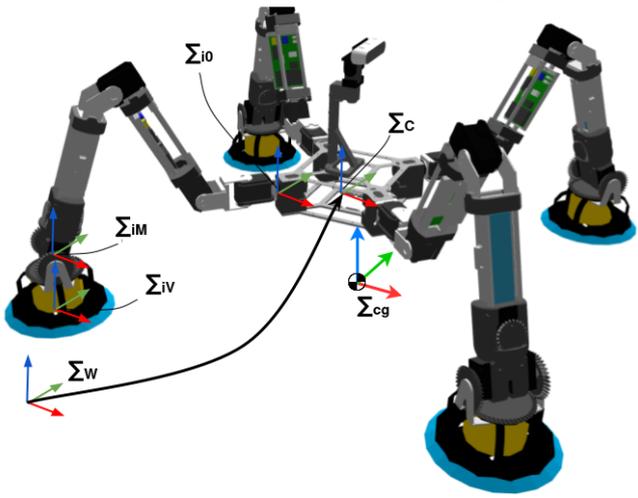


Figura 8: Sistemas de referencia del robot.

Los pasos para calcular la componente gravitatoria del modelo dinámico del robot (que queda directamente relacionado con los pares que debe ejercer cada articulación para soportar el peso del propio robot) son:

1. Calcular la matriz de transformación homogénea,  ${}^cT_{cg}$ , del centro de masas (CdM) del organismo  $\Sigma_{cg}$  con respecto a  $\Sigma_c$ . Conociendo la posición de cada articulación, y las masas y dimensiones de cada eslabón, se puede calcular el CdM de cada módulo independientemente. Posteriormente, se calcula el CdM total teniendo en cuenta los  $N$  módulos y sus masas.
2. Calcular las fuerzas de reacción, donde las posiciones de  $\Sigma_{iM}$  están referidas a  $\Sigma_{cg}$ , es decir, mediante la cinemática directa y las transformaciones conocidas se obtiene:

$${}^{cg}T_M = {}^cT_{cg}^{-1} \cdot {}^cT_{i0} \cdot {}^{i0}T_M \quad (7)$$

3. Para el cálculo de los pares necesarios en cada articulación para compensar la componente gravitatoria del organismo, se emplea el método de Newton-Euler. Básicamente, las ecuaciones de Newton-Euler describen las traslaciones combinadas y la dinámica rotacional de un cuerpo rígido. Se utilizan como base para formulaciones de sistemas multicuerpo más complicadas que describen la dinámica de sistemas de cuerpos rígidos conectados por articulaciones y otras restricciones. El vector de gravedad se obtiene de la IMU a bordo de la cámara, pasando por una transformación cinemática para referirla a  $\Sigma_c$ .

Los pares en cada una de las articulaciones se calculan, según (8), como la cantidad de fuerza aplicada  $\vec{F}$  a una determinada distancia  $\vec{r}$  entre el punto de aplicación de la fuerza y el punto de pivotación, es decir, la articulación.  $\vec{u}_q$  es el vector unitario que proyecta el momento sobre el eje de la articulación.

$$\vec{\tau} = \vec{u}_q \cdot (\vec{r} \times \vec{F}) \quad (8)$$

De una manera similar a la resolución de diagramas del momento flector, un sistema hiper-estático puede ser

planteado mediante el análisis de fuerzas que aparecen sobre el mismo en determinados puntos de interés (en este caso, en las articulaciones del organismo). Haciendo una sección en cada una de las articulaciones, se realiza un análisis de las fuerzas que quedan a uno de los lados. El camino más sencillo es aplicar las fuerzas que aparecen en el propio módulo, es decir, los pesos de los eslabones más alejados del cuerpo y la fuerza de reacción que aparece en el módulo dado.

Para cada módulo se aplica el diagrama de control mostrado en la figura 9, donde se hace uso de las transformaciones cinemáticas del robot, del compensador de gravedad y de una estimación de la posición del cuerpo, cuya implementación queda fuera del alcance de este artículo.

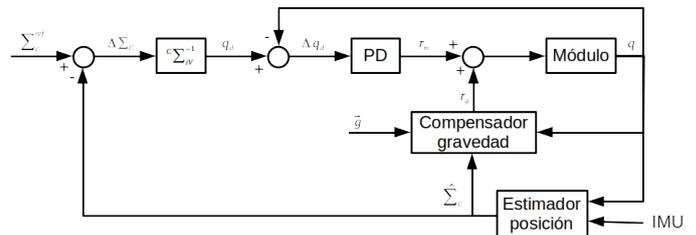


Figura 9: Diagrama de control.

## 8. Resultados

Se ha comprobado el funcionamiento de la arquitectura de control tanto con el gemelo digital como con el robot real, utilizando en ambos casos el cuerpo propuesto en la Sección 2. En primer lugar, se comandan movimientos corporales simples (vídeos disponibles en <https://youtu.be/w02W8tUM64E> y <https://youtu.be/9Q0KD2YcXns>, para el gemelo digital y para robot físico respectivamente) y, en segundo lugar, trayectorias corporales como círculos o cuadrados (<https://youtu.be/myqL09stIFk> y <https://youtu.be/6PVj6x07kCk> respectivamente). La Figura 10 muestra una secuencia de un movimiento circular realizado tanto con el organismo robótico real como con el simulado. Como se ha descrito previamente, la trayectoria se genera por el Nodo de Generación de Trayectorias de la capa Organizador, el cual envía un perfil de velocidad al Nodo del Organizador de Estados.

Las trayectorias generadas y seguidas por cada módulo (tanto para el físico como para el simulado) se muestran en la Figura 11, donde se incluyen las posiciones comandadas y aquellas que va adoptando cada articulación (excluyendo la articulación 0 que se deja como variable de estado). Como se observa en los resultados, las posiciones de las articulaciones comandadas son análogas en ambos casos para las primeras tres articulaciones, mientras que los motores de muñeca se encuentran desactivados. El error cuadrático medio (MSE de sus siglas en inglés) entre la posición comandada y estimada es de 3 cm y 1.5° para robot simulado, mientras que es de 8 cm y 5° para el sistema real. Esta discrepancia se debe a las holguras mecánicas e inexactitudes del robot físico. Cabe destacar que la precisión y exactitud del sistema no son críticas, sino su capacidad de mover de manera segura de tal manera que los pares que aparecen en cada motor no sean elevados.

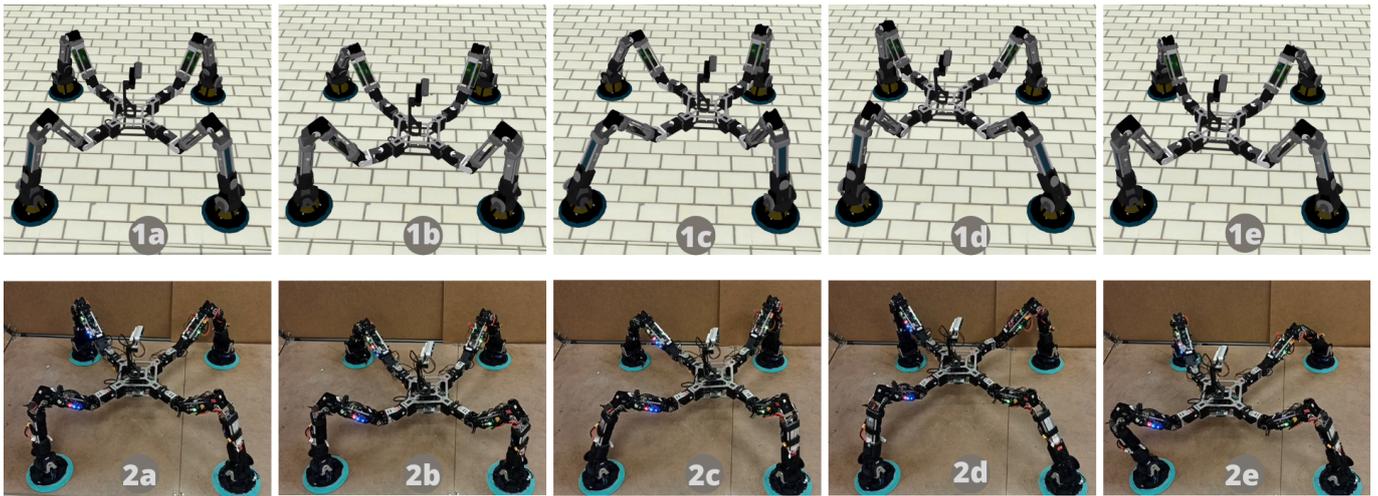


Figura 10: Capturas numeradas de la trayectoria circular realizada por el organismo robótico físico (imagen inferior) y su gemelo digital (imagen superior). El índice 'a' indica el estado inicial del robot, mientras que el resto muestran la postura en diferentes momentos del movimiento.

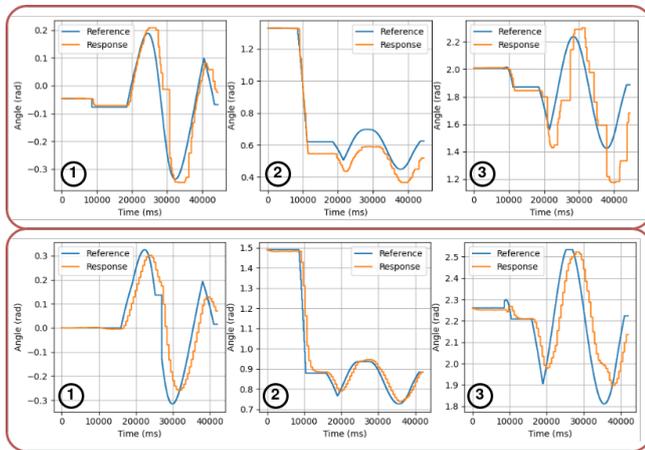


Figura 11: Trayectorias de las articulaciones 1-3 del organismo robótico (imagen superior) y de su gemelo digital (imagen inferior).

Se ha comprobado el funcionamiento de la arquitectura de control para diferentes configuraciones del organismo haciendo uso del gemelo digital por la versatilidad que este aporta (vídeos disponibles en <https://youtu.be/n0xrKEuagnw>). Para ello, se han creado las siguientes configuraciones del organismo (cuatro de ellas se muestran en la Figura 12):

- Un organismo de cuatro patas idéntico al cuerpo construido físicamente.
- Un organismo de seis patas con el cuerpo anterior donde se añaden las nuevas patas a los lados y en orientación opuesta.
- Un organismo de siete patas, agregando una pata en la parte posterior a el organismo anterior.
- Un organismo de seis patas, donde las patas laterales se alejan del cuerpo mediante extensiones.
- Un organismo de cinco patas, donde se quita una de las patas laterales del organismo de seis patas.

- Un organismo de diez patas. En este caso, el cuerpo es una gran plancha de aluminio, donde se encuentran cinco patas a cada lado.

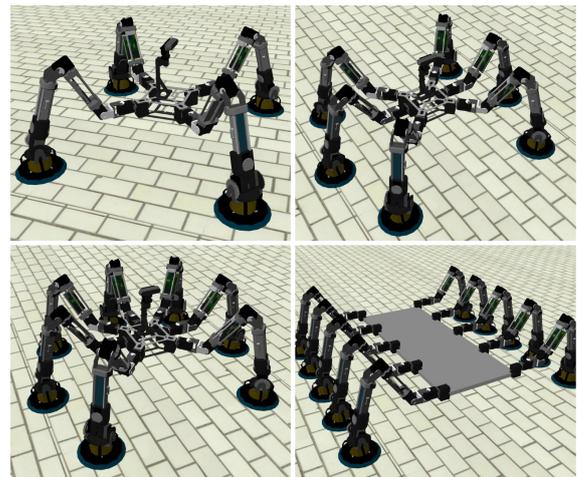


Figura 12: Ejemplo de varias configuraciones con las que se han realizado pruebas de la arquitectura de control.

Los resultados del control en par se muestran en el vídeo disponible en <https://youtu.be/KY2pANYJz2s>. Las pruebas se han realizado para diferentes situaciones, como en el techo ( $180^\circ$ ), en paredes verticales ( $90^\circ$ ), o con las patas en posiciones no simétricas (dos de ellas en una pared a  $45^\circ$ ). En el vídeo también se puede observar cómo se deshabilita el control PD del diagrama de control mostrado en la Figura 9, es decir, que cada motor está aplicando el par calculado según lo explicado en la sección 7 para compensar la gravedad, quedando el cuerpo paralizado. Los errores de posición y de orientación para una prueba con el organismo en el plano horizontal se muestran en la Figura 13. El error medio es de  $0,11 \pm 0,04$  rad y  $2,2 \pm 0,5$  cm. Los errores máximos de orientación se corresponden a los puntos por los que el cuerpo deja uno de los módulos más plegado.

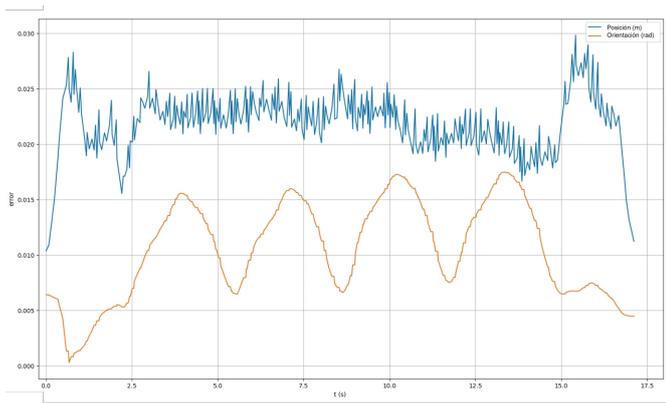


Figura 13: Errores de posición y orientación para una trayectoria circular con un organismo de configuración idéntica a ROMERIN.

## 9. Conclusiones

En este artículo se ha presentado el organismo robótico ROMERIN, un sistema escalador modular formado por patas que son robots en sí mismas. Además, se ha presentado la arquitectura de control que gobierna su comportamiento, implementada en una librería que controla la posición del cuerpo del organismo con un número cualesquiera de módulos situados en posiciones cualesquiera del cuerpo. Cada módulo es una unidad independiente utilizada para construir una estructura más compleja, de tal manera que dependiendo de la aplicación para la cual el robot sea usada, se pueden generar diferentes configuraciones del organismo. Por ejemplo, si el organismo se utiliza para la inspección de una torre de refrigeración con una sensorización poco pesada, un cuerpo como el detallado en la sección 2 puede ser de gran utilidad. Sin embargo, si se desea llevar herramientas donde el peso del conjunto ascienda notablemente es necesario utilizar un cuerpo con mayor número de módulos.

Se han detallado las características de los módulos, de las ventosas, de sus gemelos digitales, y medios de comunicación empleados, de los dispositivos necesarios para un cuerpo y de su posible estructura. Se ha demostrado el correcto funcionamiento de la estructura para diferentes configuraciones del cuerpo en simulación, a la vez que se ha comprobado en un organismo robótico físico con cuatro módulos desfasados 90°. Se ha desarrollado un sistema modular, tanto a nivel hardware como software, consiguiendo un rápido ajuste del organismo añadiendo o quitando módulos simplemente especificando su localización y sus parámetros de comunicación.

Además, se ha comprobado el funcionamiento del control en par del organismo bajo diferentes situaciones y configuraciones del organismo. Cuando se deshabilitan los controladores y se aplican únicamente los pares necesarios para compensar la gravedad del organismo, se ha comprobado experimentalmente que la estimación de fuerzas reactivas es correcta y sirve como réplica de bajo coste de los sensores fuerza/par que utilizan otros robots con patas de la literatura.

Actualmente, se dispone de un prototipo construido y completamente operativo con el que se realizan pruebas experimentales. Respecto a la arquitectura de control, ésta sirve como base de bajo nivel para el control de robots como los descritos en este artículo, por lo que nuevas características y capacidades se pueden incluir en las diferentes capas, especialmente en la

superior. Por ejemplo, la integración de un planificador que optimice la seguridad y consumo energético de un organismo de N módulos, o un generador de fases de vuelo y de apoyo.

## Agradecimientos

Esta investigación ha recibido financiación de RobotCity230-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub, S2018/NMT-4331, fundado por “Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid” y cofinanciado por “Structural Funds of the EU”. El proyecto en el cual este trabajo está siendo desarrollado fue inicialmente fundado por el Plan Nacional Español de Investigación e Innovación de Ciencia y Tecnología, DPI2017-85738-R.

## Referencias

- Alkalla, M. G., Fanni, M. A., Mohamed, A. M., Hashimoto, S., mar 2017. Tele-operated propeller-type climbing robot for inspection of petrochemical vessels. *Industrial Robot: An International Journal* 44 (2), 166–177. URL: <https://doi.org/10.1108/2FIR-07-2016-0182>
- Andrikopoulos, G., Papadimitriou, A., Brusell, A., Nikolakopoulos, G., nov 2019. On model-based adhesion control of a vortex climbing robot. In: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Firos.2019.8968069>
- Baghani, A., Ahmabadi, M., Harati, A., 2005. Kinematics modeling of a wheel-based pole climbing robot (UT-PCR). In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Frobot.2005.1570423>
- Bandyopadhyay, T., Steindl, R., Talbot, F., Kottege, N., Dungavell, R., Wood, B., Barker, J., Hoehn, K., Elfes, A., oct 2018. Magneto: A versatile multi-limbed inspection robot. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Firos.2018.8593891>
- Bellicoso, C. D., Gehring, C., Hwangbo, J., Fankhauser, P., Hutter, M., 2016. Perception-less terrain adaptation through whole body control and hierarchical optimization. In: 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, pp. 558–564. URL: <https://doi.org/10.1109/2Fhumanoids.2016.7803330>
- Bisht, R. S., Pathak, P. M., Panigrahi, S. K., 2022. Design and development of a glass façade cleaning robot. *Mechanism and Machine Theory* 168, 104585.
- Buettner, T., Heppner, G., Roennau, A., Dillmann, R., jul 2019. Nimble limbs - intelligent attachable legs to create walking robots from variously shaped objects. In: 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Faim.2019.8868845>
- Buettner, T., Wilke, D., Roennau, A., Heppner, G., Dillmann, R., sep 2018. A scalable, modular leg design for multi-legged stair climbing robots. In: *Robotics Transforming the Future*. CLAWAR Association Ltd. URL: <https://doi.org/10.13180/2Fclawar.2018.10-12.09.34>
- Büschges, A., Schmidt, J., dec 2015. Neuronal control of walking: studies on insects. *e-Neuroforum* 21 (4), 105–112. URL: <https://doi.org/10.1515/2Fs13295-015-0017-8>
- Desai, R., Li, B., Yuan, Y., Coros, S., sep 2018. Interactive co-design of form and function for legged robots using the adjoint method. In: *Robotics Transforming the Future*. CLAWAR Association Ltd. URL: <https://doi.org/10.13180/2Fclawar.2018.10-12.09.26>
- Eto, H., Asada, H. H., may 2020. Development of a wheeled wall-climbing robot with a shape-adaptive magnetic adhesion mechanism. In: 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Ficra40945.2020.9196919>
- Fankhauser, P., Bellicoso, C. D., Gehring, C., Dube, R., Gavel, A., Hutter, M., nov 2016. Free gait — an architecture for the versatile control of legged robots. In: 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Fhumanoids.2016.7803401>
- Ge, D., Ren, C., Matsuno, T., Ma, S., oct 2016. Guide rail design for a passive suction cup based wall-climbing robot. In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/2Firos.2016.7759850>

- Gilpin, K., Rus, D., sep 2010. Modular robot systems. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 17 (3), 38–55.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Fmra.2010.937859>
- Grieco, J., Prieto, M., Armada, M., de Santos, P. G., 1998. A six-legged climbing robot for high payloads. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications* (Cat. No.98CH36104). IEEE.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Fcca.1998.728488>
- Hernando, M., Alonso, M., Prados, C., Gambao, E., 2021a. Behavior-based control architecture for legged-and-climber robots. *Applied Sciences* 11 (20).  
URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/20/9547>
- Hernando, M., Brunete, A., Gambao, E., 2019. ROMERIN: A modular climber robot for infrastructure inspection. *IFAC-PapersOnLine* 52 (15), 424–429.  
URL: <https://doi.org/10.1016/2Fj.ifacol.2019.11.712>
- Hernando, M., Gambao, E., Prados, C., Brito, D., Brunete, A., 2022. ROMERIN: A new concept of a modular autonomous climbing robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 19 (5), 17298806221123416.  
URL: <https://doi.org/10.1177/17298806221123416>
- Hernando, M., Gómez, V., Brunete, A., Gambao, E., feb 2021b. CFD modelling and optimization procedure of an adhesive system for a modular climbing robot. *Sensors* 21 (4), 1117.  
URL: <https://doi.org/10.3390/2Fs21041117>
- Herzog, A., Rotella, N., Mason, S., Grimminger, F., Schaal, S., Righetti, L., 2016. Momentum control with hierarchical inverse dynamics on a torque-controlled humanoid. *Autonomous Robots* 40 (3), 473–491.  
URL: <https://doi.org/10.1007/2Fs10514-015-9476-6>
- Humza, R., Scholz, O., Mokhtar, M., Timmis, J., Tyrrell, A., nov 2009. Towards energy homeostasis in an autonomous self-reconfigurable modular robotic organism. In: *2009 Computation World: Future Computing, Service Computation, Cognitive, Adaptive, Content, Patterns*. IEEE.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Fcomputationworld.2009.83>
- Hutter, M., Gehring, C., Bloesch, M., Hoepflinger, M. A., Remy, C. D., Siegwart, R., jul 2012. Starleth: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion. In: *Adaptive Mobile Robotics*. World Scientific, pp. 483–490.  
URL: [https://doi.org/10.1142/2F9789814415958\\_0062](https://doi.org/10.1142/2F9789814415958_0062)
- Hutter, M., Gehring, C., Jud, D., Lauber, A., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Hwangbo, J., Bodie, K., Fankhauser, P., Bloesch, M., Diethelm, R., Bachmann, S., Melzer, A., Hoepflinger, M., oct 2016. ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Firos.2016.7758092>
- Iida, F., oct 2007. Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control. *Artificial Life* 13 (4), 419–421.  
URL: <https://doi.org/10.1162/2Fartl.2007.13.4.419>
- Jakimovski, B., Meyer, B., Maehle, E., 2009. Self-reconfiguring hexapod robot oscar using organically inspired approaches and innovative robot leg amputation mechanism. In: *International Conference on Automation, Robotics and Control Systems, ARCS-09, Orlando, USA*.
- Kamagalah, B., Kumar, J. S., Virk, G. S., jul 2012. Design of multi-terrain climbing robot for petrochemical applications. In: *Adaptive Mobile Robotics*. World Scientific, pp. 639–646.  
URL: [https://doi.org/10.1142/2F9789814415958\\_0082](https://doi.org/10.1142/2F9789814415958_0082)
- Katz, D., Kenney, J., Brock, O., 2008. How can robots succeed in unstructured environments. In: *In Workshop on Robot Manipulation: Intelligence in Human Environments at Robotics: Science and Systems*. Citeseer.
- Kennedy, B., Okon, A., Aghazarian, H., Badescu, M., Bao, X., Bar-Cohen, Y., Chang, Z., Dabiri, B. E., Garrett, M., Magnone, L., Sherrit, S., jul 2006. Lemur IIb: a robotic system for steep terrain access. *Industrial Robot: An International Journal* 33 (4), 265–269.  
URL: <https://doi.org/10.1108/2F01439910610667872>
- Kim, D., Di Carlo, J., Katz, B., Bledt, G., Kim, S., 2019. Highly dynamic quadruped locomotion via whole-body impulse control and model predictive control. *arXiv preprint arXiv:1909.06586*.
- Kim, H., Kim, D., Yang, H., Lee, K., Seo, K., Chang, D., Kim, J., aug 2008. Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology* 22 (8), 1490–1498.  
URL: <https://doi.org/10.1007/2Fs12206-008-0413-x>
- Longo, D., Muscato, G., mar 2006. The alicia/sup 3/ climbing robot: a three-module robot for automatic wall inspection. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13 (1), 42–50.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Fmra.2006.1598052>
- Maehle, E., Brockmann, W., Grosspietsch, K.-E., Auf, A. E. S., Jakimovski, B., Krannich, S., Litza, M., Maas, R., Al-Homsy, A., 2011. Application of the organic robot control architecture ORCA to the six-legged walking robot OSCAR. In: *Organic Computing — A Paradigm Shift for Complex Systems*. Springer Basel, pp. 517–530.  
URL: [https://doi.org/10.1007/2F978-3-0348-0130-0\\_34](https://doi.org/10.1007/2F978-3-0348-0130-0_34)
- Megaro, V., Thomaszewski, B., Nitti, M., Hilliges, O., Gross, M., Coros, S., nov 2015. Interactive design of 3d-printable robotic creatures. *ACM Transactions on Graphics* 34 (6), 1–9.  
URL: <https://doi.org/10.1145/2F2816795.2818137>
- Murray IV, T. J., Pham, B. N., Pirjanian, P., May 3 2005. Hardware abstraction layer for a robot. US Patent 6,889,118.
- Peidro, A., Tavakoli, M., Marín, J. M., Reinoso, Ó., may 2019. Design of compact switchable magnetic grippers for the HyReCRo structure-climbing robot. *Mechatronics* 59, 199–212.  
URL: <https://doi.org/10.1016/2Fj.mechatronics.2019.04.007>
- Peters, G., Pagano, D., Liu, D., Waldron, K., aug 2010. A prototype climbing robot for inspection of complex ferrous structures. In: *Emerging Trends in Mobile Robotics*. World Scientific.  
URL: [https://doi.org/10.1142/2F9789814329927\\_0020](https://doi.org/10.1142/2F9789814329927_0020)
- Prados, C., Buonocore, L. R., Castro, M. D., jul 2021. Omnidirectional robotic platform for surveillance of particle accelerator environments with limited space areas. *Applied Sciences* 11 (14), 6631.  
URL: <https://doi.org/10.3390/2Fapp11146631>
- Qiaoling, D., Yan, L., Sinan, L., 2019. Design of a micro pole-climbing robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16 (3), 1729881419852813.
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., 2008. BigDog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes* 41 (2), 10822–10825.  
URL: <https://doi.org/10.3182/2F20080706-5-kr-1001.01833>
- Roennau, A., Heppner, G., Nowicki, M., Dillmann, R., jul 2014. LAURON v: A versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability. In: *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Faim.2014.6878051>
- Schmidt, D., Berns, K., dec 2013. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—a survey of design aspects and technologies. *Robotics and Autonomous Systems* 61 (12), 1288–1305.  
URL: <https://doi.org/10.1016/2Fj.robot.2013.09.002>
- Sombolestan, M., Chen, Y., Nguyen, Q., 2021. Adaptive force-based control for legged robots. In: *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 7440–7447.
- Sprowitz, A., Pouya, S., Bonardi, S., Kieboom, J. V. D., Mockel, R., Billard, A., Dillenbourg, P., Ijspeert, A. J., aug 2010. Roombots: Reconfigurable robots for adaptive furniture. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 5 (3), 20–32.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Fmci.2010.937320>
- Sprowitz, A., Moeckel, R., Vespignani, M., Bonardi, S., Ijspeert, A., jul 2014. Roombots: A hardware perspective on 3d self-reconfiguration and locomotion with a homogeneous modular robot. *Robotics and Autonomous Systems* 62 (7), 1016–1033.  
URL: <https://doi.org/10.1016/2Fj.robot.2013.08.011>
- Tan, K. C., Wang, L., Lee, T. H., Vadakkepat, P., jul 2006. Evolvable hardware in evolutionary robotics. In: *World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems*. World Scientific, pp. 33–62.  
URL: [https://doi.org/10.1142/2F9789812773142\\_0002](https://doi.org/10.1142/2F9789812773142_0002)
- Tanaka, Y., Shirai, Y., Lin, X., Schperberg, A., Kato, H., Swerdlow, A., Kumagai, N., Hong, D., 2022. Scaler: A tough versatile quadruped free-climber robot. *arXiv preprint arXiv:2207.01180*.
- Tavakoli, M., Viegas, C., Marques, L., Pires, J. N., de Almeida, A. T., sep 2013. OmniClimbers: Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures. *Robotics and Autonomous Systems* 61 (9), 997–1007.  
URL: <https://doi.org/10.1016/2Fj.robot.2013.05.005>
- Wang, M., Su, Y., Liu, H., Xu, Y., aug 2020. WalkingBot: Modular interactive legged robot with automated structure sensing and motion planning. In: *2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Fro-man47096.2020.9223474>
- Yim, M., Zhang, Y., Duff, D., feb 2002. Modular robots. *IEEE Spectrum* 39 (2), 30–34.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2F6.981854>
- Yoshida, Y., Ma, S., dec 2010. Design of a wall-climbing robot with passive suction cups. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. IEEE.  
URL: <https://doi.org/10.1109/2Frobio.2010.5723554>