

# **Desarrollo de robots caminantes y escaladores en el IAI-CSIC**

P. González de Santos, M. Armada, E. García, T. Akinfiyev, J. No, M. Prieto, S. Nabulsi, J. A. Cobano, R. Ponticelli, J. Sarriá, J. Reviejo, C. Salinas y A. Ramos

Departamento de Control Automático  
Instituto de Automática Industrial - CSIC  
Ctra. Campo Real Km 0,2  
28500 Arganda del Rey, Madrid



## **Presentación del Departamento de Control Automático**

El Departamento de Control Automático (DCA) del Instituto de Automática Industrial (IAI) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) tiene como objetivo fundamental la investigación sobre el análisis y el diseño de sistemas en el marco institucional del Área Científico-Técnica de Ciencias y Tecnologías Físicas, con el equivalente, en el ámbito universitario, de Ingeniería de Sistemas y Automática.

A lo largo de los 35 años de existencia del DCA se han cultivado varias líneas de investigación, inicialmente centradas en el Control Automático y posteriormente en el área de la Robótica. En la actualidad la actividad del departamento se centra en:

1. La investigación teórica y práctica de sistemas de control y robótica
2. La formación de personal científico (preferentemente mediante la realización de tesis doctorales y tesis de maestría)
3. La impartición de cursos de formación
4. La organización de conferencias internacionales, y
5. La elaboración y ejecución de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, enfocados de manera significativa en la resolución de los problemas que presentan las nuevas generaciones de robots y en la automatización avanzada de diversos procesos de producción.

La consecución de proyectos de investigación pre-competitivos redundan de una forma clara en la potenciación de las líneas de investigación a medio y largo plazo. En la actualidad, las líneas de investigación fundamentales del departamento son:

1. Sistemas de control de accionamientos electromecánicos.

2. Robots manipuladores específicos
3. Amplificadores de potencia humana (*Human Power Amplifiers*) y dispositivos inteligentes para asistencia en la manipulación (*Intelligent Assist Devices*)
4. Robots móviles: robots caminantes y escaladores, robots bípedos y robots submarinos

### **Actividad del departamento de Control Automático**

El Departamento de Control Automático (<http://www.iai.csic.es/users/dca>) comenzó a desarrollar sistemas robotizados en 1980, cuando acometió el diseño y construcción del robot industrial EI-25 para INISEL –lo que resultó ser el primer robot con accionamientos eléctricos desarrollado en España– o el proyecto SIROIN, llevado a cabo en cooperación con Equipos Nucleares S.A. (ENSA), en el que se desarrolló un sistema robotizado para la inspección y el mantenimiento de los generadores de vapor de las centrales nucleares que incorporaba técnicas de teleoperación y telepresencia (véase la figura 1).

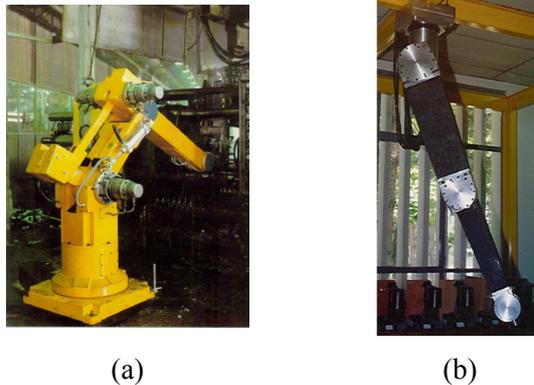


Figura 1. (a) Manipulador EI-25, manipulador SIROIN

Ambos proyectos proporcionaron al DCA una gran madurez en el área de la Robótica, lo que le situó en una posición inmejorable para afrontar los retos científicos y técnicos que suponen abordar nuevas aplicaciones en sectores no tradicionales. Nuestras investigaciones en el campo de la robótica se han encaminado, en los últimos quince años, de una forma especialmente intensa hacia el campo de los robots para medios hostiles y aplicaciones especiales.

### **Desarrollo de robots caminantes y escaladores en el IAI-CSIC**

A finales de la década de lo 80, el DCA realiza un giro en sus investigaciones, disminuyendo su actividad en la investigación de robots manipuladores y adentrándose en los robots caminantes. Nuestra idea básica era explorar las posibilidades que ofrecía este tipo de locomoción que estaba emergiendo en un gran número de universidades y centros de investigación, principalmente en EEUU y Japón, donde los grupos liderados por los profesores McGhee y Waldron, en *Ohio State University*,

y el profesor Hirose, en el *Tokyo Institute of Technology*, ya habían conseguido resultados importantes.

### ***Investigación básica en robots caminantes***

Nuestros primeros trabajos parten de una asociación con el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) con quienes realizamos los primeros estudios y conseguimos la primera financiación de la CICYT para acometer el desarrollo de nuestro primer robot caminante.

### ***RIMHO***

Aprovechando la experiencia de CIEMAT en los entornos nucleares, nuestro primer robot lo enfocamos a estos ambientes. Surge, así, el robot RIMHO (acrónimo de Robot de Intervención en Medios Hostiles); primer robot caminante que se llevó a cabo en nuestro país, lo que situó nuestras investigaciones en una posición de privilegio en este campo. RIMHO es un cuadrúpedo cuyas patas están basadas en una configuración pantográfica. Este dispositivo presenta la característica de que todos los motores están ubicados en el cuerpo del robot con lo que las patas resultan especialmente delgadas y ligeras y, además, los movimientos del pie, en las tres componentes del sistema de referencia de la pata, están desacoplados; esto es, cada motor puede mover el pie en la dirección de un eje del sistema de referencia, lo que simplifica notablemente el modelo cinemático del dispositivo. Otra característica a considerar es el desacoplo gravitacional de manera que el cuerpo del robot se puede mover en un plano horizontal mientras las articulaciones que soportan la acción de la gravedad pueden estar bloqueadas (frenos activados) sin consumir energía. El robot RIMHO sirvió para la validación de modos de caminar periódicos continuos y discontinuos para cuadrúpedos y se utilizó para realizar experimentos encaminados a la evaluación de máquinas caminantes para detección y



Número de patas	4
Dimensiones del cuerpo	736×710×344 mm
Tipo de pata	Pantógrafo
Longitud de los eslabones	500 mm
Peso	65 kg
Carga útil	10 kg
Velocidad	1 m/minuto

Figura 2. Robot caminante RIMHO y características básicas

localización de minas antipersonas [19] [29] [30] [31]. RIMHO se presenta en la figura 2 donde se incluye algunas de sus características.

### **SILO-4**

Las primeras investigaciones utilizando el robot RIMHO como banco de experimentación prosiguieron con otros proyectos financiados por la CICYT, como el desarrollo de sistemas locomotores sensorizados para robots caminantes del que se derivó el robot cuadrúpedo SILO-4 (Sistema Locomotor de 4 patas). El robot SILO-4 se configuró como un robot caminante de tamaño medio con el propósito de que sirviera como banco de experimentación para investigación básica y docencia. SILO-4 es un robot compacto, modular y robusto capaz de adentrarse en terrenos irregulares con desniveles inferiores a 0.25 m (véanse el robot y sus características en la figura 3), puede portar cargas de hasta 15 kg y alcanzar velocidades de 1.5 m/s. De este robot se han construido tres réplicas



Número de patas	4
Dimensiones del cuerpo	310×310×300 mm
Tipo de pata	Insecto
Longitud de los eslabones	240 mm
Peso	30 kg
Carga útil	15 kg
Velocidad	1.5 m/minuto

Figura 3. Robot caminante SILO-4 y características básicas

que se encuentran en el IAI-CSIC, Universidad de Bourges (Francia) y la Universidad de Murcia.

Uno de los problemas de las investigaciones en robots caminantes radica en el hecho de que las diferentes técnicas y algoritmos de control se comprueban en robots desarrollados por los propios grupos de investigación y no se favorece el estudio comparativo; esto es, la experimentación y valoración de diferentes trabajos sobre el mismo robot. El DCA en un intento de paliar este problema ha puesto a disposición de la comunidad científica todos los detalles de diseño del robot SILO-4, que pueden encontrarse en la página *web* del robot (<http://www.iai.csic.es/users/silo4>), con el ánimo de que los grupos interesados fabriquen su propia réplica.

Sobre este robot se ha probado un elevado número de algoritmos relativos a la generación de modos de caminar entre los que destacan modos continuos, discontinuos, periódicos y libres [5] [6] [7] [8]. Este robot dispone de sensores de fuerza triaxiales en los pies lo que ha permitido desarrollar algoritmos de distribución y control de fuerza [10] para mejorar la tracción, disminuir el deslizamiento

y permitir la interacción con el entorno: robustez frente a fuerzas perturbadoras externas, acomodación activa y controladores reactivos [13]. Además, se han realizado trabajos sobre medidas de estabilidad estáticas [23] y dinámicas [11] [14] [15] [16]. Los trabajos más significativos con este robot se han resumido en [20] y [21].

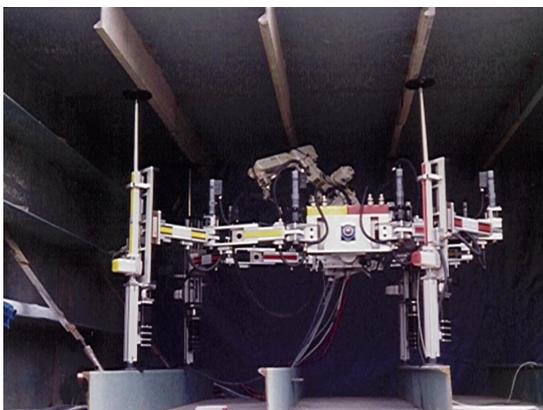
### Aplicaciones industriales de robots caminantes y escaladores

Los resultados iniciales sirvieron para conseguir importantes contratos de investigación para la transferencia a la práctica industrial de la tecnología y el conocimiento adquirido en el área de los robots caminantes. Fruto de estas investigaciones es el robot caminante ROWER y los robots escaladores REST y REST2, diseñados para la automatización de las tareas de soldadura en el complejo entorno de la construcción naval.

#### **ROWER**

En construcción naval se pueden distinguir claramente dos partes del proceso: las actividades en taller, donde se fabrican grandes bloques con un grado de automatización elevado y una gran calidad de soldadura, y las actividades en grada o dique que se realizan manualmente o con herramientas semiautomáticas muy precarias consiguiendo calidades muy desiguales (dependen básicamente de la pericia del operario) y, sobre todo, productividad muy baja. Un dato adicional son las malas condiciones de trabajo de los operarios que se realiza en celdas cerradas donde aparecen concentraciones de humos.

El DCA acometió la automatización del problema de soldadura en las celdas del doble fondo de barcos en un proyecto financiado por la UE. El sistema está formado por una plataforma móvil (ROWER, *Robot for Welding in Ship Erection Processes*) que porta un sistema de soldadura comercial compuesto por un manipulador de 6 grados de libertad que manipula la antorcha de soldadura. El



Número de patas	4
Dimensiones del cuerpo	1380×550 ×250 mm
Tipo de pata	SCARA
Longitud de los eslabones	630 mm (Horizontales)
Peso	400 kg
Carga útil	130 kg
Velocidad	0.5 m/minuto

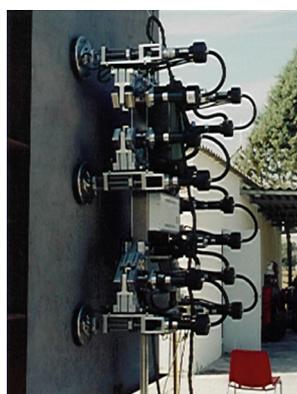
Figura 4. Robot caminante ROWER y características básicas

equipo se completa con un sistema de visión estereoscópica y una estación de control que incluye una base de datos con información referente a la geometría de la celda y los parámetros de soldadura. La plataforma móvil se basa en un robot cuadrúpedo con patas tipo SCARA que puede caminar a lo largo y ancho de la celda anclándose firmemente a los refuerzos de la estructura (véase la figura 4). Esta plataforma acomoda en el centro de su cuerpo el manipulador al que puede desplazar en sentido vertical. En total, esta plataforma proporciona cuatro grados de libertad adicionales al manipulador (desplazamiento longitudinal, lateral, vertical y giro alrededor de un eje vertical al suelo). La plataforma puede ensamblarse y desensamblarse fácilmente para permitir su introducción en las celdas a través del paso de hombre (600 mm × 800 mm), pesa 400 kg y es capaz de desplazar una carga de 130 kg [17] [24]. La figura 4 presenta el robot ROWER e incluye sus características principales.

### ***REST***

El robot escalador REST (Robot escalador para soldadura a tope) se desarrolló en un proyecto con Astilleros Españoles S.A., hoy dentro del consorcio Izar, y con financiación CDTI. Se pretendía resolver parte de los problemas de soldadura que no se podían solventar con el sistema ROWER, tales como la soldadura a tope de las caras planas del buque que se encuentran en el casco exterior y en los paneles que conforman los depósitos, en el caso de petroleros. Éste es un problema tradicionalmente resuelto por operarios que se desplazan por el casco del barco mediante la instalación de andamios. El montaje y desmontaje de estos andamios supone un costo importante y un número de accidentes considerable. La idea de configurar un robot escalador capaz de portar el sistema de soldadura comercial similar al utilizado por el sistema ROWER se mostró como una solución interesante.

El robot se configuró, pues, como un sistema escalador con patas de tipo SCARA como mecanismo de locomoción con el fin de poder sobrepasar las cornisas que aparecen en la cara lisa de los barcos. Nótese que los mecanismos con patas pueden sobrepasar estos obstáculos fácilmente, mientras que los



Número de patas	6
Dimensiones del cuerpo	1100 × 490 × 230 mm
Tipo de pata	SCARA
Longitud de los eslabones	260 mm
Peso	200 kg
Carga útil	100 kg
Velocidad	1 m/minuto

Figura 5. Robot escalador REST y características básicas

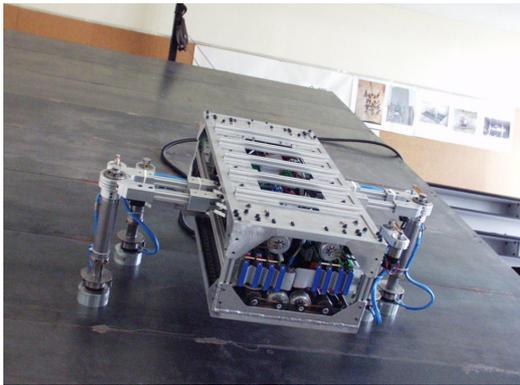
vehículos tradicionales basados en ruedas u orugas presentan dificultades. Cada pie dispone de 8 electroimanes que le permiten adherirse a una superficie ferromagnética. La carga del escalador se estimó en 100 kg incluyendo un manipulador comercial de 53 kg y todos los accesorios del sistema de soldadura. Esto obligó a disponer de una gran fuerza de sustentación, por lo que fue necesario configurar el sistema en torno a seis patas simplemente para aumentar el número de pies adheridos a la superficie y así aumentar la fuerza de agarre del sistema. En este sistema se implementaron modos de escalado manteniendo siempre 5 pies en contacto con la superficie. La figura 5 muestra el robot REST y sus características más significativas [2][3][4].

### ***REST-2***

La aparición en el mercado de sistemas de soldadura de 4 grados de libertad y peso reducido rebajó considerablemente las necesidades de carga útil de los robots de manera que las plataformas móviles podían reducirse hasta pesos manejables directamente por uno o dos operarios. Por el contrario, REST con sus 200 kg de peso necesitaba sistemas auxiliares para su instalación en el entorno de trabajo. Surge así el desarrollo del robot escalador REST-2, con financiación CICYT, que se diseñó para la misma aplicación que el robot REST, pero para portar un manipulador de soldadura muy liviano (alrededor de 5 kg), lo que repercutió enormemente en el peso final del robot que ronda los 40 kg. REST-2 es un cuadrúpedo con una configuración de pata muy especial que consta de dos eslabones con un extremo común en el que se sitúa una articulación prismática. Cada extremo libre de un eslabón se desplaza mediante un husillo a lo largo del cuerpo del robot. Si los dos husillos se desplazan a la misma velocidad y sentido la pata se mueve adelante o atrás, dependiendo del sentido de avance de los husillos. Este movimiento constituye el primer grado de libertad de la pata. Si la velocidad o la dirección de los husillos es diferente, la pata se mueve perpendicularmente al eje longitudinal del cuerpo. Este movimiento constituye el segundo grado de libertad de la pata. El tercer grado de libertad lo forma la articulación prismática unida al punto de unión de los eslabones. En cada lado del cuerpo se disponen dos patas en distintos niveles de manera que una pata puede desplazarse por debajo o por encima de la otra. Esto permite una serie de movimientos a lo largo del cuerpo del robot, que alternados convenientemente producen el desplazamiento del robot. Los pies están dotados de electroimanes que permiten la adherencia del robot a paredes ferromagnéticas. La figura 6 muestra una fotografía del robot y presenta sus características básicas [1] [2] [3].

### **Nuevas aplicaciones de robots caminantes**

El DCA en un intento de desarrollar robots que le permitieran seguir con sus investigaciones en locomoción caminante ha acometido en los últimos años dos proyectos de desarrollo en nuevas aplicaciones que han producido el robot caminante SILO-6 y el robot escalador ROBOCLIMBER.



Número de patas	4
Dimensiones del cuerpo	800×360×250 mm
Tipo de pata	-----
Longitud de los eslabones	260 mm
Peso	40 kg
Carga útil	5 kg
Velocidad	1 m/minuto

Figura 6. Robot escalador REST-2, estructura de la pata y características básicas

### **SILO-6**

SILO-6 es un robot caminante desarrollado como plataforma móvil del sistema DYLEMA (Técnicas de sensorización y control para la detección y localización eficiente de minas antipersonas), financiado por el Plan Nacional I+D+i, que tiene como objetivo esencial el desarrollo de un sistema de detección y localización de minas antipersonas (<http://www.iai.csic.es/users/silo6>). SILO-6 (Sistema Locomotor de 6 patas) es un robot hexápodo que porta un manipulador que maneja una cabeza sensora que incluye un detector comercial de minas metálicas y sensores para controlar la altura de la cabeza al suelo y detectar posibles objetos en su camino.

La tarea fundamental del robot SILO-6 es servir de plataforma móvil capaz de explorar completamente un campo. El sistema incorpora algoritmos para la completitud del terreno (técnicas de *complete coverage*) [12] y la posición de las alarmas (minas potenciales) las registra en una base de datos con ayuda de un sistema de integración sensorial que se alimenta de un GPS, dos inclinómetros, una brújula electromagnética, y los 18 sensores de posición de las articulaciones. Este sistema sensorial también se utiliza para el seguimiento en lazo cerrado de la trayectoria de la plataforma móvil, tarea fundamental para la completitud del terreno.

SILO-6 está basado en 6 patas porque los hexápodos presentan mejor estabilidad estática que los cuadrúpedos y pueden alcanzar, desde el punto de vista teórico, mayores velocidades. Estabilidad y velocidad son características básicas a la hora de acometer aplicaciones reales. En este punto conviene tener en cuenta que los robots caminantes estáticamente estables son intrínsecamente lentos y cualquier acción encaminada a mejorar su velocidad es siempre interesante.

Las patas del SILO-6 se basan en una estructura insecto de 3 grados de libertad que tiene la particularidad de disponer los motores fuera de la estructura de la pata. De esta forma los motores, que constituye la parte más cara de la pata, están alejados del pie que es el punto con más riesgo de sufrir

accidente (explosiones accidentales). El cuerpo del robot se ha configurado para disminuir los pares realizados por las patas centrales en un intento de optimizar el diseño y disminuir el consumo energético [22]. La energía se suministra a través de un grupo de baterías que le dan una autonomía de una hora, aproximadamente.

El robot SILO-6 se desplaza por terreno natural siguiendo una trayectoria previamente planificada, adaptándose automáticamente a las irregularidades del terreno y evitando posarse sobre las alarmas indicadas por el detector situado en la parte frontal del robot caminante. Este manipulador efectúa el barrido de la parte delantera coordinando sus movimientos con los del robot móvil.

SILO-6 pesa 60 kg y tiene una carga útil de unos 10 kg (incluye el manipulador y las baterías), camina utilizando trípodes alternados con adaptación al terreno y evitando pisar sobre las zonas prohibidas. La figura 7 muestra una fotografía del robot y sus características básicas [18] [22] [25] [26] [27].



Número de patas	6
Dimensiones del cuerpo	880×400×250 mm
Tipo de pata	insecto
Longitud de los eslabones	238 mm
Peso	60 kg
Carga útil	10 kg
Velocidad	1.5 m/minuto

Figura 7. Robot caminante SILO-6 y características básicas

### ***ROBOCLIMBER***

El último robot caminante desarrollado por el grupo de investigación ha sido el robot ROBOCLIMBER, realizado dentro de dos proyectos CRAFT (UE). ROBOCLIMBER consiste en un cuadrúpedo portador de las herramientas y maquinaria necesarias para la compactación de terrenos en construcción civil. Esta tarea consiste en la perforación de agujeros de hasta 2 m, la introducción de barras metálicas y la cementación del agujero. El robot pesa 2 toneladas y es capaz de portar hasta 1.5 toneladas en equipos auxiliares (taladradora, alimentador de barras, etc.).

El sistema se sustenta colgado de dos cables afianzados en la cima de la ladera. La longitud de los cables está coordinada por el controlador del robot, de manera que su longitud se acorta según asciende el robot. Las patas se utilizan para aislar la maquinaria auxiliar de las irregularidades del

terreno y, además, los seis grados de libertad del cuerpo permiten el posicionamiento y la orientación de la taladradora.

Las patas del robot están basadas en una estructura ortogonal de 3 grados de libertad rotatoria-prismática-prismática accionada por cilindros hidráulicos. La energía se obtiene de un generador alimentado por motor de explosión, por tanto la máquina es autónoma desde el punto de vista energético.

El desarrollo de este robot ha formado al personal del departamento en la tecnología hidráulica lo que supone un gran paso para el desarrollo de grandes máquinas, como ROBOCLIMBER [28] [32] [33], o máquinas más rápidas que utilicen controladores dinámicos, que es uno de los retos futuros de los desarrollos del departamento. La figura 8 muestra ROBOCLIMBER con sus características más relevantes.



Número de patas	4
Dimensiones del cuerpo	0.65×1.6×3 m
Tipo de pata	ortogonal
Longitud de los eslabones	0.97 – 1.27 m
	1.11 – 1.85 m
Peso	2 T
Carga útil	1.5 T
Velocidad	1 m/minuto

Figura 8. ROBOCLIMBER y características básicas

## Conclusiones

Los robots caminantes son vehículos con unas grandes prestaciones y ventajas sobre los vehículos convencionales. Tradicionalmente, se admite que tienen todas las ventajas sobre los vehículos con ruedas y orugas salvo dos: velocidad y complejidad. Los robots caminantes para aplicaciones industriales y de servicios son, básicamente, máquinas estáticamente estables con unas prestaciones de velocidad muy limitadas y el sistema electromecánico es mucho más complejo que los vehículos tradicionales. Sin embargo, se ha demostrado que existe un campo importante de aplicación y deben seguir estudiándose hasta lograr que desbanque a los robots móviles en aquellas aplicaciones donde, al menos teóricamente, son más potentes.

En el apartado de configuraciones ya no hay mucho, aparentemente, que innovar. Se conocen bien las ventajas e inconvenientes de cada estructura de pata y configuración de robot. Sin embargo, debe hacerse un esfuerzo para incorporar nuevos materiales que aligeren la masa total del robot y sobre todo deben incorporarse nuevos actuadores que ofrezcan mejores relaciones par/peso y con velocidades superiores.

Resueltos estos problemas, los robots caminantes y escaladores darían, sin duda, un gran paso para situarse en el lugar que les corresponde, a la luz de las realizaciones biológicas (caminantes y escaladores) que se observan en la naturaleza.

### **Agradecimientos**

Nuestro agradecimiento a las instituciones que han financiado las investigaciones que han producido los robots presentados en este artículo; éstas son: CICYT (ROB1990-1044-C02-01, TAP1994-0783, TAP1999-1080-C04-01, TAP1999-0993), Plan Nacional de I+D+i (DPI2001-1595, DPI2004-05824), CDTI (PACE PR 212) y ECC (BRITE EURAM BE2-7229, GROWTH G1ST-CT-2002-50160, FP6-CE- COOP-CT-2005-016842).

### **Referencias**

- [1] Akinfiyev, T. and M. Armada, "The Influence of Gravity on Trajectory Planning for Climbing Robots with Non-rigid Legs", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol 35, pp. 309-326, 2002.
- [2] Armada, M. "Robotics: now and beyond", *Industrial Robot*, Vol. 32, No. 2, 2005.
- [3] Armada, M.A., P. Gonzalez de Santos, M.A. Jimenez and M. Prieto, "Application of CLAWAR machines", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22 , No. 3-4, pp. 251-164. April, 2003.
- [4] Balaguer, C., G.S. Virk, M. Armada, "Climbing and walking robots", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(1) pp. 5- 6, 2005.
- [5] Estremera, J. and P. Gonzalez de Santos, "Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 21, No. 2, pp. 115-130, February 2002.
- [6] Estremera, J. and P. Gonzalez de Santos, "Generating continuous free crab gaits for quadruped robots on irregular terrain", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1067-1076, 2005.
- [7] Estremera, J., E. Garcia and P. Gonzalez de Santos, "A Multi-Modal and Collaborative Human-Machine Interface for a Walking Robot," *Journal of Intelligent and Robotic Systems* Vol. 35, pp. 397-425, 2002.
- [8] Estremera, J., P. Gonzalez de Santos and J. A. Lopez-Orozco, "Neural virtual sensor for terrain adaptation of walking machines", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 22, No. 6, pp. 229-311, 2005.
- [9] Fernández, R., J. Hespanha, T. Akinfiyev, M. Armada, "Dual Smart Drive Nonlinear Control Using Backstepping and a Time-Optimal Reference", *Autonomous Robots*, 19 (3), pp. 233-255, 2005.

- [10] Galvez, J. A., J. Estremera and P. Gonzalez de Santos, "A new legged-robot configuration for research in force distribution", *Mechatronics*, Vol. 13, pp. 907-932, 2003.
- [11] Garcia, E. and P. Gonzalez de Santos, "An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effect", *Robotica*, Vol. 23, No. 11, pp. 13-20, 2005.
- [12] Garcia, E. and P. Gonzalez de Santos, "Mobile Robot Navigation with Complete Coverage of Unstructured Environments", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 46, No. 2, pp. 195 – 204, 2004.
- [13] Garcia, E. and P. Gonzalez de Santos, "On the improvement of walking performance in natural environments by a compliant adaptive gait", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 5, pp. 1240-1253, December 2006.
- [14] Garcia, E., J. Estremera and P. Gonzalez de Santos, "A comparative study of stability margins for walking machines", *Robotica*, Vol. 20, No. 6, pp. 595-606. November, 2002.
- [15] Garcia, E., J.A. Galvez and P. Gonzalez de Santos, "On finding the relevant dynamics for model based controlling walking robots", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 37, No.4, pp. 375-398, August 2003.
- [16] Garcia, E., P. Gonzalez de Santos and C. Canudas de Wit, "Velocity dependence in the cyclic friction arising with gears", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 21, No. 9, pp. 761-771. Septiembre, 2002.
- [17] Gonzalez de Santos, P., M. A. Armada and M.A. Jiménez, "An Industrial Walking Machine for Naval Construction", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97)*, Albuquerque, NM, USA, pp. 28 - 33, 1997.
- [18] Gonzalez de Santos, P., J.A. Cobano, E. Garcia, J. Estremera, M.A. Armada, "A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions", *Mechatronics*, In press, 2007.
- [19] Gonzalez de Santos, P. and M.A. Jiménez, "Generation of Discontinuous Gaits for Quadruped Walking Machines", *Journal of Robotic Systems*; Vol.: 12, N. 9, pp. 599-611, 1995.
- [20] Gonzalez de Santos, P., J.A. Galvez, J. Estremera and E. Garcia, "SILO4 - A true walking robot for the comparative study of walking machine techniques", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 10, No. 4, pp. 23-32, December 2003.
- [21] Gonzalez de Santos, P., E. Garcia and J. Estremera, *QUADRUPEDAL LOCOMOTION: An Introduction to the Control of Four-Legged Robots*, Springer, London, 2006.
- [22] Gonzalez de Santos, P., J. Estremera and E. Garcia, "Optimizing Leg Distribution Around the Body in Walking Robots", *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'05)*, Barcelona, Spain, 18-22 April, pp: 3218-3223, 2005.
- [23] Gonzalez de Santos, P., J. Estremera, E. Garcia and M. Armada, "Including Joint Torques and Power Consumption in the Stability Margin of Walking Robots", *Autonomous Robots*, Vol. 18, pp. 43-57, January 2005.
- [24] Gonzalez de Santos, P., M.A. Jiménez and M.A. Armada, "Improving the motion of walking machines by autonomous kinematic calibration", *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 2, pp. 135-156, March 2002.
- [25] Gonzalez, de Santos, P., E. Garcia, J. Estremera and M. Armada, "DYLEMA: Using Walking Robots for Landmine Detection and Location", *Internacional Journal of Systems Science*, Vol. 36, No. 9, pp. 545-558, 2005.

- [26] Guardabrazo, T. A. and P. Gonzalez de Santos, "Building an energetic model to evaluate and optimize power consumption in walking robots", *Industrial Robot*, Vol. 31, No. 2, pp. 201-204, 2004.
- [27] Guardabrazo, T. A., M.A. Jimenez and P. Gonzalez de Santos, "Analysing and solving body misplacement problems in walking robots with round rigid feet", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 54, pp. 256-264, March, 2006.
- [28] H. Montes, S. Nabulsi, M. Armada, "Built-in high accuracy force sensing implementation for walking robots", *The International Journal of Robotics Research*, 25( 9) pp. 931-950, 2005.
- [29] Jiménez, M. A and P. Gonzalez de Santos, "Attitude and position control methods for realistic legged vehicle", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 18, pp. 345-354, 1996.
- [30] Jiménez, M. A and P. Gonzalez de Santos, "Terrain adaptive gait for walking machines", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 16, N. 3, pp. 320-339, 1997.
- [31] Jiménez, M. A. and P. Gonzalez de Santos, "Position-based motion control and adaptability of periodic gaits for realistic walking machines" *International Journal of Systems Science*, Vol. 27, N. 8, pp. 723-730, 1996.
- [32] Molfino, R., M. Armada, F. Cepolina, M. Zoppi, "ROBOCLIMBER the 3 ton spider", *Industrial Robot*, vol. 32, No. 2, pp. 163-170, 2005.
- [33] Montes, H., L. Pedraza, M. Armada, T. Akinfiyev, R. Caballero, "Adding extra sensitivity to the SMART non-linear actuator using sensor fusion", *Industrial Robot*, Vol. 31, No. 2, pp. 179-188, 2004