

## TELEMANIPULACIÓN Y LOCOMOCIÓN MEDIANTE ROBOTS MODULARES RECONFIGURABLES EN ENTORNOS SEMIESTRUCTURADOS

**Juan A. Escalera\*, Manuel Ferre\*, Rafael Aracil\* y Miguel A. Sánchez-Urán\*\***

*\* Departamento de Automática Ingeniería Electrónica e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006, Madrid, España (e-mail: jescalera@etsii.upm.es, m.ferre@upm.es, rafael.aracil@upm.es)*

*\*\* Depto. de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, Ronda de Valencia, nº 3, 28012, Madrid, España, (miguelangel.sanchezuan@upm.es)*

**Resumen:** Este artículo se centra en la aplicación de robots modulares en entornos semi-estructurados. La principal ventaja que tiene este sistema autoconfigurable es su capacidad tanto de desplazamiento como de manipulación de objetos. Se describe en detalle la arquitectura implementada para la realización de tareas, esta arquitectura se basa en el control de los módulos que forman estructuras más complejas, llamadas moléculas. Las moléculas implementan el comportamiento de un robot y pueden cambiar de configuración según sea la etapa de la tarea en curso. El sistema, denominado RobMAT, cuenta con una avanzada interfaz de teleoperación que permite el guiado de módulos y moléculas así como la calibración de entornos. Los experimentos realizados hasta la fecha ponen de manifiesto la importancia de la sincronización de los módulos y el control de las trayectorias. La sincronización es imprescindible para la cooperación entre módulos y el interpolador de trayectorias para el guiado de las moléculas. *Copyright © 2008 CEA-IFAC*

**Palabras Clave:** Telemanipulación, robots modulares, telerrobótica, entornos semiestructurados.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las tareas de telemanipulación en entornos semiestructurados, o no estructurados, son uno de los objetivos tradicionales de los robots de servicio. En este trabajo se describe la propuesta realizada dentro del proyecto ROBMAT, que se basa en la utilización de robots modulares y autoconfigurables para la realización de tareas de campo. La principal contribución del sistema ROBMAT es la posibilidad de realizar distintos tipos de tareas en función de la configuración adoptada, con ayuda de la teleoperación. Esto permite que los módulos puedan adoptar una configuración para locomoción, de tal modo que el robot se acerque al entorno de trabajo, y una vez alcanzado pueda reconfigurarse alcanzando otra configuración para la realización de la correspondiente tarea de telemanipulación.

Tradicionalmente, los sistemas teleoperados constan de uno o varios telemanipuladores que trabajan en el entorno remoto y del correspondiente vehículo que los transporta. La posibilidad de reconfiguración representa un avance significativo, ya que, simplifica la realización de numerosas tareas.

En el apartado siguiente se describen los principales sistemas de robots modulares desarrollados hasta la fecha. En el tercer apartado se detallan las características del sistema ROBMAT, con especial énfasis en la arquitectura del sistema desarrollado y en las soluciones adoptadas para su diseño. El apartado cuarto describe la interfaz de teleoperación del sistema, en la que destacan la visión estereoscópica, la superposición de imágenes y la reflexión de fuerzas. El quinto apartado describe las diferentes pruebas y trabajos experimentales realizados con el sistema modular; y finalmente en el

último apartado se enumeran las principales conclusiones del trabajo realizado.

## 2. INTERÉS DE LOS ROBOTS BASADOS EN SISTEMAS MODULARES

El objetivo de todo sistema modular es que la funcionalidad y prestaciones del conjunto sea mayor que la suma de los componentes. La aplicación de este concepto en robótica implica que las prestaciones de un robot modular deben ser superiores a las de la suma de sus módulos. Los robots modulares aparecen como una alternativa a los robots convencionales que están especializados en la realización de una tarea concreta. En este sentido un robot modular está compuesto por un conjunto de elementos genéricos que pueden combinarse para la realización de diferentes tipos de tareas. El reto de los robots modulares es adaptarse a distintos trabajos y entornos, a la vez que los trabajos se realizan eficientemente.

La principal ventaja de la utilización de robots modulares es la posibilidad de construir diferentes cadenas cinemáticas combinando módulos entre sí. Estas cadenas pueden ser simples o complejas, según sea la disposición y el número de módulos que las forman. Las principales cuestiones a resolver en el diseño de robots modulares son:

- Morfología de los módulos y conexión entre ellos.
- Capacidad de procesamiento de los módulos.
- Comunicaciones, sincronización y coordinación entre módulos.
- Grado de especialización y rol de cada módulo dentro del sistema global.

La resolución de los puntos anteriores es lo que hace que un sistema modular se comporte como un verdadero robot en el que los módulos trabajan de forma coordinada.

### 2.1 Caracterización y clasificación de los robots modulares

El diseño de los módulos tiene un papel relevante en el comportamiento del sistema. Los principales parámetros son: el número de grados de libertad de los módulos, las dimensiones de los módulos y el tipo de conector entre módulos. La mayor parte de los sistemas disponen de módulos de 1 o 2 grados de libertad, hasta la fecha sólo existen dos casos en los que el módulo conste de 3 gdl como son el SuperBot (Shen et al., 2006) y RobMAT (Escalera et al., 2005). Otras características importantes en el diseño del módulo son el tipo de microprocesador empleado, y los sensores y actuadores que utiliza. Todo esto determinará el tamaño del robot, así como su interacción con el entorno.

Una primera clasificación de los robots modulares es la relativa al grado de interacción entre sus módulos. Así pues, puede distinguirse entre los sistemas que se acoplan entre sí mecánicamente y los que no permiten el acoplamiento. Entre los primeros destacan los trabajos conocidos como PolyBot (Yim et al., 2002), M-TRAN (Murata et al., 2002) y CONRO (Castano et al., 2002). Estos sistemas están formados por módulos relativamente simples que se acoplan entre sí. En ambos casos utilizan una arquitectura de control centralizada en la que se controla el comportamiento de todo el sistema, esto es posible gracias a las características del canal de comunicación que se establece en la unión entre módulos. De otro lado, cuando los módulos no están acoplados mecánicamente entre sí, el sistema modular es similar a una red de robots, en los que la arquitectura de control es distribuida o descentralizada. Ejemplo de estos son los sistemas basados en colonias como (McKee y Schenker, 2000; Navarro-Sermet et al., 2002; y Caprari et al., 2002).

Una clasificación bastante difundida de los robots modulares es la realizada en base a la movilidad de los módulos, así pues se clasifican en reticulares, cadena y móviles o colonias. Los robots modulares del tipo reticular se caracterizan porque sus módulos sólo pueden alcanzar un conjunto limitado de posiciones espaciales, lo que hace que sus configuraciones sean similares a las de una rejilla o retícula (Murata et al., 1998, Kotay et al., 1998; Lipson et al., 2005; Jorgensen et al., 2004; Unsal et al., 2001). En los robots basados en cadenas, por el contrario, las articulaciones pueden alcanzar cualquier valor dentro de sus límites de movimiento. (Castano et al., 2002; Yim et al., 2002; Kurokawa et al., 2002). Los robots modulares basados en colonias cuentan con una red de robots que navega con cierta coordinación, ejemplo de ello son los conocidos como swarm-bot (Gross et al., 2005; y Fukuda y Kawachi, 2004).

Existe un parámetro adicional para la caracterización de los robots modulares, el cual se basa en la existencia o no de módulos especializados. En este sentido los robots modulares se clasifican como homogéneos (o unitarios) y heterogéneos. Los robots modulares homogéneos son más simples de controlar, mientras que los heterogéneos ofrecen mayor flexibilidad en la realización de tareas al disponer de módulos especializados.

Todos los robots modulares son considerados como reconfigurables por definición, pero sólo unos pocos de ellos tienen la capacidad de autoconfiguración; lo cual implica que durante la ejecución de la tarea son capaces de cambiar su configuración en base a las características del entorno o de la tarea. La mayor parte de los que tienen capacidad de autoconfiguración lo hacen en espacios planos (Pamecha et al., 1996; Rus et al., 2001) y solo unos pocos tienen capacidad de reconfiguración en

espacios tridimensionales (Tomita et al., 1999; Yim et al., 2002; Murata et al., 2002; Castano et al., 2002).

### 3. ARQUITECTURA DE CONTROL DEL SISTEMA ROB MAT

Según la clasificación citada en el apartado anterior, el sistema RobMAT puede definirse como heterogéneo, ya que los módulos disponen de diferentes tipos de sensores y actuadores. Respecto a la movilidad de los módulos dentro del robot, su categoría es de tipo cadena. La arquitectura de control es distribuida, ya que aunque dentro de las moléculas la información está centralizada en el módulo que actúa como maestro, la relación entre moléculas dentro de la colonia se corresponde con un sistema descentralizado que es coordinado desde la estación de control de la colonia.

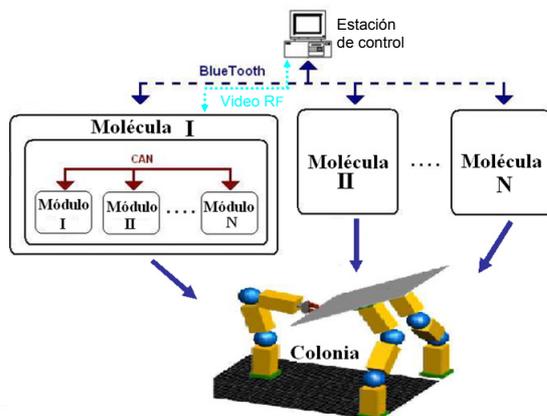


Figura 1. Esquema de la arquitectura del sistema ROB MAT con los canales de comunicación existentes entre los diferentes elementos.

#### 3.1 Descripción de la arquitectura del sistema RobMAT.

Los componentes de la arquitectura del sistema RobMAT son los **módulos** y las **moléculas**, y su conjunto se denomina **colonia**, tal y como se muestra en la figura 1. Los módulos son los componentes más simples que tienen capacidad propia de movimiento y comunicaciones. Una molécula es una entidad propia formada por varios módulos con capacidad propia de desplazamiento y/o manipulación.

En cada molécula se elige un módulo encargado de gestionar las comunicaciones con el exterior y el sincronismo entre módulos. Estas funciones serán realizadas a la par de las propias de ser módulo. Este módulo se llama maestro. La configuración de la molécula puede cambiar durante el transcurso de la tarea. La colonia es el conjunto de todas las moléculas que intervienen durante la realización de tareas.

La arquitectura implementada tiene como finalidad que las moléculas tengan el comportamiento de un robot y que puedan cooperar entre sí. Para conseguir esto se han desarrollado varios canales de comunicación en las moléculas y mecanismos de sincronización entre éstas.

Los protocolos de comunicación utilizados por la moléculas son CAN (CAN, 1991) y Bluetooth (BT, 2007). Dentro de las moléculas las transmisiones se hacen mediante el bus CAN, ya que los elementos están físicamente unidos; por el contrario, cuando no existe conexión física se utiliza el canal de Bluetooth para la transmisión de datos y un enlace de radio frecuencia para la transmisión de vídeo PAL. El bus CAN tiene una gran difusión en el entorno industrial y presenta numerosas ventajas por su utilización en robots modulares. La primera es la velocidad de transmisión que puede llegar a 1 Mbit/s. La segunda es la posibilidad de incluir nuevos dispositivos al bus de comunicaciones de forma sencilla, lo cual facilita la conexión de nuevos módulos a la molécula. Así pues todas las comunicaciones intra-molécula se realizan vía bus CAN. El módulo maestro es el encargado de recibir los mensajes desde el exterior y distribuirlo dentro de molécula vía CAN. La información transmitida dentro de la molécula es relativa a comandos de bajo nivel, y contiene referencias para los bucles de control de movimiento, información de sincronización, y datos de los sensores y actuadores.

El protocolo Bluetooth tiene también una gran difusión en la actualidad y es muy usado en el entorno de oficinas y periféricos de computador. La principal ventaja que tiene para su utilización en el sistema RobMAT es que evita la utilización de cables y que existen circuitos integrados que implementan todo el protocolo, por lo que se comporta como si fuera un puerto serie convencional, desde el punto de vista de la CPU de los módulos. Su principal inconveniente es la baja velocidad de transmisión de datos, que no puede superar los 19,2 kbits/s. Un segundo inconveniente es debido al número máximo de dispositivos que pueden conectarse dentro de la red particular formada por nodos Bluetooth denominada piconet. El número de nodos de esta red está limitado a siete. En el caso del RobMAT esto no presenta una gran limitación en la actualidad, ya que el número de moléculas es cuatro pero podría ser una limitación en el caso de grandes colonias. Los comandos enviados vía Bluetooth están referidos al tipo de acción que deben realizar las moléculas. Estos comandos son originalmente generados por el operador y transformados en las correspondientes órdenes a cada molécula. También se pueden transmitir comandos entre moléculas vía Bluetooth, y en este caso el computador de control es el encargado de retransmitirlos al destino. Esta funcionalidad es muy útil en el caso de cooperación entre moléculas, ya que es preciso enviar los correspondientes

mensajes de control entre ellas para el comienzo y finalización en los puntos de sincronismo.

Tabla 1 Características del canal de comunicación y movilidad del sistema RobMAT

Componente	GDL	Espacio de trabajo	Canal	Movilidad
Módulo	3	Superficie esférica	CAN	Ninguno
Molécula base	5	Volumen Esférico	CAN y BT	Superficies Metálicas
Molécula compleja	$\geq 10$	Unión de Esferas	CAN BT y RF	Sin restricción

Existe un tercer canal de comunicaciones que es el de transmisión de vídeo mediante radiofrecuencia a 2.4GHz. Esta información requiere un gran ancho de banda y por tanto precisa de un canal dedicado para ello. La transmisión de vídeo se realiza desde una de las moléculas que porta 2 mini cámaras hasta el computador de control, en el que se le muestran las imágenes de vídeo al operador. La transmisión de imágenes es fundamental para poder teleoperar las moléculas, además se visualizan imágenes estereoscópicas en el caso de realizar manipulación remota, para que el operador tenga una percepción precisa de la profundidad del entorno remoto de trabajo.

### 3.2 Comportamiento de las moléculas del sistema RobMAT.

El comportamiento característico de un robot reside en las moléculas; es decir, tienen la capacidad de ejecutar un programa e interactúan con su entorno durante la ejecución de tareas. Las moléculas están compuestas por varios módulos, y la funcionalidad alcanzada dependerá del número de módulos conectados. Como se ha comentado previamente, las comunicaciones de la molécula son gestionadas por el módulo maestro el cual se comunica vía CAN con el resto de los módulos y vía Bluetooth con el computador de control.

La molécula más simple se denomina molécula base, está compuesta por la unión de 2 módulos. Esta molécula tiene posibilidad de manipulación gracias a sus 5 gdl y capacidades limitadas de desplazamiento. Necesita elementos de sujeción al suelo debido a la imposibilidad de mantener el equilibrio sobre un único apoyo, esto limita las superficies sobre las que puede “caminar”. Su espacio de trabajo se corresponde con el volumen de una esfera, existiendo una pequeña región en la que no puede trabajar ya que los módulos colisionan entre sí. Cuando varias moléculas base se unen dan lugar a una nueva

estructura que se denomina molécula compleja. El número de grados de libertad de estas moléculas es muy elevado ( $\geq 10$ ) y esto le da grandes posibilidades, tanto para la manipulación de objetos, como de movilidad ya que pueden desplazarse por cualquier superficie con la condición de controlar adecuadamente el centro de gravedad de la molécula. Cuando las moléculas varían su morfología se precisa establecer un nuevo maestro dentro de la molécula encargado de la gestión de las comunicaciones y de generar la señal de sincronismo para los relojes. Todo esto se establece a través de los servicios de mensajes del bus CAN.

En la figura 2 se muestra una molécula compleja compuesta por la unión de dos moléculas base. Conviene destacar que en la molécula compleja existen dos articulaciones que soportan una molécula base completa, esto es posible gracias a la correcta sincronización de las articulaciones en movimiento.

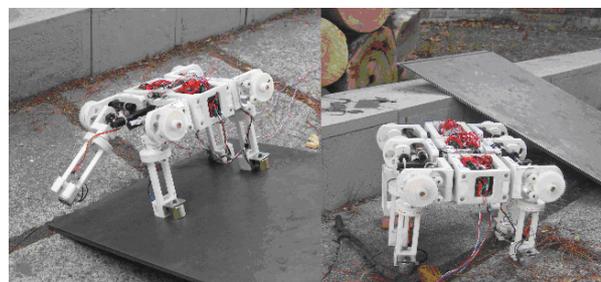


Figura 2. Ejemplos de moléculas complejas compuestas por varias moléculas base. El movimiento coordinado de las articulaciones es posible gracias al sincronismo de todos los módulos que componen la molécula.

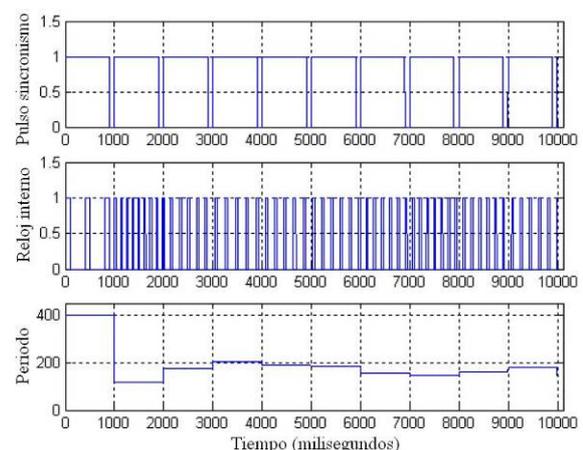


Figura 3. Señales para la sincronización de los relojes internos de los módulos. El pulso de sincronismo es generado por el módulo maestro y los demás ajustan sus contadores.

El principal problema a resolver por las moléculas es la sincronización de movimientos entre módulos. Esta sincronización es necesaria para que todas las articulaciones realicen sus movimientos de forma

coordinada, ya que en caso contrario el movimiento realizado por la molécula tendría mucha incertidumbre e incluso podrían dañarse los objetos que se manipulan. Así pues, se precisa un mecanismo que garantice que todas las articulaciones comienzan y finalizan sus movimientos de forma coordinada. Existen diferentes posibilidades para generar el reloj dentro de la molécula normalmente basadas en el paso de mensajes (Chow y Johnson, 1997; y Xu, 1990).

La solución adoptada en el caso del RobMAT utiliza mensajes pero no para generar la señal de reloj sino para marcar puntos de control del mismo. Es decir, todos los módulos tienen un reloj interno que es reajustado cuando se recibe el mensaje de sincronismo del módulo maestro. Este es un mensaje corto y de alta prioridad dentro del bus CAN. La solución adoptada ha dado muy buenos resultados, ya que la desviación que se produce entre los relojes internos de los módulos es del orden del milisegundo lo cual da muy buenos resultados para el seguimiento de trayectorias y la coordinación de movimientos dentro de una misma molécula. En la figura 3 se muestran los resultados de la sincronización de los relojes internos de los módulos.

### 3.3 Diseño de los módulos del sistema RobMAT.

El módulo diseñado para el robot RobMAT pretende alcanzar un equilibrio entre complejidad de diseño y funcionalidad. El objetivo es obtener módulos de unas prestaciones intermedias sin que ello implique un diseño sofisticado. Las prestaciones mínimas que se requieren al módulo son la capacidad de realizar el control de trayectorias de acuerdo con las referencias recibidas del exterior, y que el diseño mecánico sea lo más simple posible, evitando la utilización de complejos elementos de transmisión; por ello, todos los actuadores se encuentran agrupados en la misma zona.

El módulo diseñado consta de 3 grados de libertad de rotación cuyos ejes se cortan en un punto, y un controlador propio, tal y como se muestra en la figura 4. Los actuadores utilizados son tres motores Maxon, modelo RE 13 motor de CC. Sus principales características son la reductora de 275:1, que aporta un par de salida total de 0,3Nm y un encoder de 16 pulsos por vuelta. Se trata de un conjunto muy ligero de 46 g, cuya longitud total es de 68mm.

El módulo incorpora además la electrónica de control y potencia. El controlador está compuesto por un DSP de Texas Instrument, de 150 MIPS, y algunos periféricos, como memoria y puertos de comunicaciones, más detalles pueden encontrarse en (Escalera J., et al., 2005). En la figura 5 se muestran varias vistas de la electrónica desarrollada para los módulos.

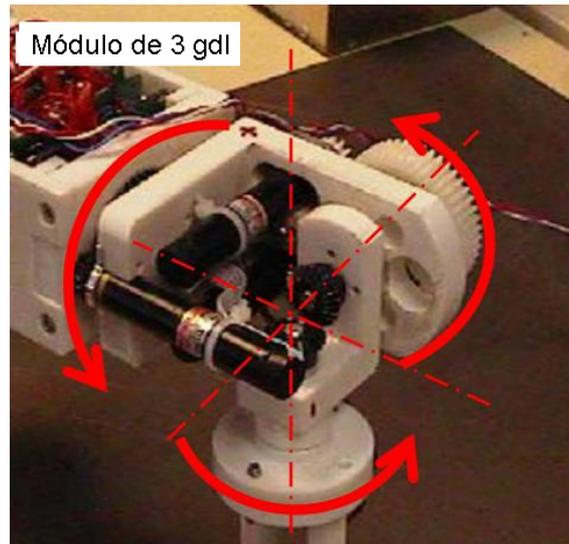


Figura 4. Diseño mecánico del módulo diseñado para el sistema RobMAT.

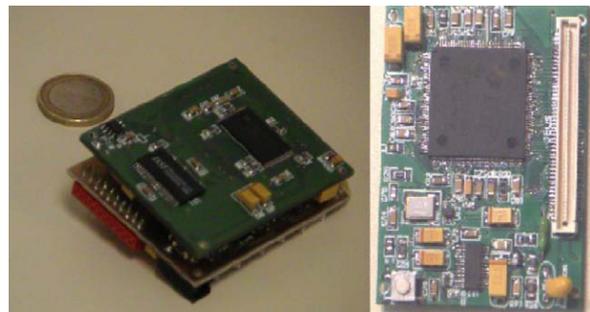


Figura 5. Tarjetas electrónicas del controlador del módulo (65x50x8 mm) (izquierda), tarjeta de procesamiento con un DSP de Texas Instrument. (derecha).

El controlador del módulo es el encargado de la generación de sus movimientos y del procesamiento de la información suministrada por sus sensores. Las dos funciones básicas de movimiento que lleva a cabo son: generación de trayectorias mediante un interpolador 414 e implementación de un PID para el control de posición de cada articulación.

La generación de trayectorias mediante un interpolador 414 consiste en dar una secuencia de puntos que el robot debe seguir teniendo en cuenta una serie de restricciones. Su función es dar consignas al lazo de control con mayor frecuencia a la de los puntos recibidos desde la estación de control de forma que se cumpla con un determinado perfil de posición, velocidad, aceleración y jerk. El interpolador implementado en el esquema de control es de tipo polinomial de tres tramos. El primer tramo es de aceleración y esta generado por un polinomio de grado 4, el segundo tramo es de velocidad constante, polinomio de grado 1 y el último tramo es de frenado y al igual que el primero utiliza un polinomio de grado 4. En la figura 6 se muestra la

forma de cada una de las magnitudes. Se puede observar la continuidad en posición, velocidad y aceleración, no así en jerk, para lo cuál habría que aumentar el grado de los polinomios. El interpolador tiene implementadas además otras funcionalidades útiles como limitación de velocidad e interpolación multipunto que permite realizar la teleoperación de modo suave.

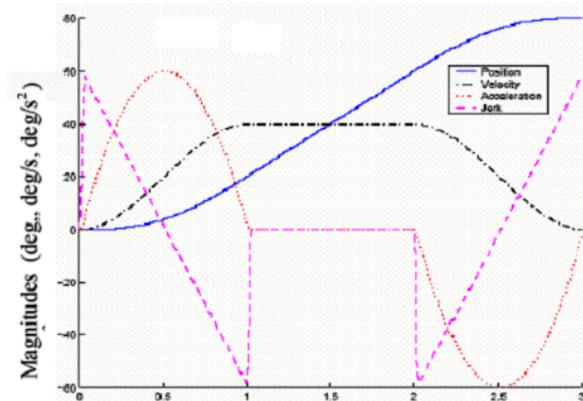


Figura 6. Perfiles de posición, velocidad, aceleración y jerk generado para el movimiento de las articulaciones del RobMAT.

La salida del interpolador es la entrada del bloque donde se encuentran los reguladores. En este bloque se cierra el lazo de control en posición de cada una de las tres articulaciones con que cuenta el módulo. Engloba tres reguladores PID. Es un típico ejemplo de control desacoplado que da buenos resultados gracias a la elevada reducción de los actuadores. En la siguiente figura se muestra el esquema de funcionamiento del control de trayectorias que se realiza en los módulos.

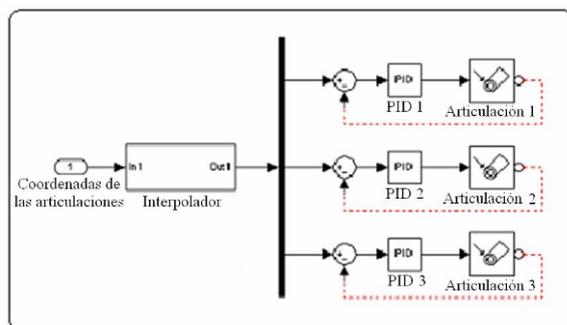


Figura 7. Esquema de funcionamiento del interpolador de trayectorias del módulo y los regulares PID de sus articulaciones.

#### 4. INTERFAZ DE TELEOPERACIÓN

La interfaz de teleoperación permite al operador actuar sobre toda la colonia y le realimenta información del estado de la tarea. El operador actúa

a diferentes niveles sobre la colonia de robots. Los comandos generados por el operador dependen de la información que se disponga del entorno de trabajo y de la tarea a realizar. Todos los equipos que componen la interfaz de teleoperación se encuentran integrados en la estación de control; por tanto, la información intercambiada por el operador y los módulos se hace vía Bluetooth, excepto el vídeo que se transmite vía RF.

El operador puede actuar sobre la colonia en diferentes niveles, que van desde la actuación directa sobre una articulación hasta una orden de reconfiguración de la colonia. Los diferentes niveles de actuación del operador son:

- Guiado del movimiento de un módulo y de una molécula.
- Generación de comandos de movimiento de alto nivel.
- Calibración de entornos remotos semiestructurados de trabajo.

Este conjunto de comandos permite llevar a las moléculas hasta el entorno de trabajo, y una vez alcanzado éste que las moléculas cambien su configuración para realizar tareas de manipulación. Los dispositivos de interfaz que utiliza el operador son un joystick de 3 gdl que dispone de una funcionalidad de reflexión de fuerzas; y un sistema de visualización de imágenes estereoscópicas y de superposición de imágenes (Ferre et al., 2005).

##### 4.1 Guiado de módulos y moléculas

Tanto el guiado de los módulos como el de las moléculas representa una generación de comandos de bajo nivel, que se lleva a cabo mediante el joystick. Los comandos generados implican una actuación directa sobre los controladores de las articulaciones del robot. Así pues, la órdenes de movimiento generan los correspondientes valores de referencia en los lazos de control de los módulos. El ordenador de la estación de control apenas realiza ningún procesamiento, ya que se limita a transmitir la información en uno y otro sentido, sin a penas realizar ningún procesamiento. En la figura 8 se muestra un escena típica del guiado de moléculas, en la que el operador visualiza imágenes estereoscópicas y genera referencias de velocidad con el joystick.

El guiado de los módulos es el más simple. El operador indica la molécula y el módulo que se desea controlar; y a partir de ese momento, la actuación del operador sobre el joystick se transforma en referencias de velocidad sobre las correspondientes articulaciones de módulo indicado. La reflexión de fuerzas es utilizada para indicar al operador cuando se ha alcanzado un límite articular, lo cual hace que no se puedan generar comandos en esa dirección. La interacción entre el joystick y el módulo se realiza eje a eje, ya que ambos dispositivos disponen de 3 gdl.



Figura 8. Teleoperación del sistema RobMAT. El operador está guiando una molécula, para ello genera órdenes de movimiento con un joystick mientras visualiza imágenes estereoscópicas.

La actuación sobre las moléculas es más compleja. El operador selecciona una molécula (que puede tener uno o más puntos fijos) y selecciona un punto de referencia, dicho punto puede ser el extremo de un módulo, el centro de la molécula o cualquier otro punto previamente definido; a partir de ese momento la actuación del operador sobre el joystick se transforma en una referencia de velocidad para el punto seleccionado por el operador. Este tipo de guiado implica que todas las articulaciones de la molécula puedan ser actuadas a la vez, dependiendo de la relación entre los puntos fijos de la molécula y el punto seleccionado por el operador. En este caso la reflexión de fuerzas también indica al operador aquellas direcciones de movimiento en las cuales no es posible mover la molécula. Evidentemente, la actuación sobre la molécula en su conjunto es más eficiente para la realización de tareas que sobre los módulos independientemente. En ambos tipos de guiado la reflexión de fuerzas, aunque tiene una calidad baja, resulta muy útil al operador, ya que le indica qué articulaciones han alcanzado alguno de sus límites de movimiento.

#### 4.2 Generación de comandos de movimiento de alto nivel.

Los comandos de alto nivel son relativos al comportamiento de una o más moléculas. En este caso el operador indica acciones de movimiento para una molécula, o envía comandos de acoplamiento/desacoplamiento entre moléculas. En el caso de comandos de alto nivel la estación de control precisa realizar un procesamiento mayor de comandos, ya que tiene que traducir los comandos del operador a las correspondientes órdenes de movimiento de las moléculas.

Los comandos de alto nivel de movimiento son relativos al desplazamiento de las moléculas. Estos desplazamientos se indican como una composición

de movimientos en línea recta y giros. Dichos movimientos son recibidos en las moléculas, las cuales lo traducen en patrones de movimiento (gaits) para los módulos. El patrón de movimiento que realiza cada módulo depende del tipo de configuración de la molécula. El objetivo es que todos los módulos realicen el mismo tipo de movimiento pero con diferente fase inicial de forma que la composición final de los movimientos de los módulos genere el movimiento deseado en la molécula.

El patrón de movimiento para la molécula base es el más sencillo de todos, simplemente se requiere que un módulo esté fijado al suelo mientras que el otro realiza el avance, y así alternativamente hasta que se llega al punto deseado. En el siguiente apartado se describen varias secuencias de este movimiento. Para moléculas complejas, no se requiere que ningún módulo esté fijado al suelo. En este caso el requisito es relativo al centro de gravedad de la molécula que siempre debe conservarse dentro la molécula. Para ello el patrón de movimiento programado consiste en extender los módulos y hacerlos girar de forma sincronizada en la dirección de avance deseado de la molécula.

Los comandos de cambio de configuración de la molécula son enviados por el operador cuando se precisa un cambio en la colonia para adaptarse a la realización de una nueva etapa de la tarea. La reconfiguración requiere cambiar las conexiones mecánicas entre las moléculas base y gestionar cuales deben ser los módulos maestros de cada molécula. La desconexión de moléculas base es simple, ya que sólo se requiere la desactivación de los imanes que las unen. Algo más complejo es la conexión de moléculas base que implican el correcto alineamiento entre ellas previo a la activación de los imanes. Cuando es conocida la posición relativa de las moléculas su alineación puede ser realizada automáticamente, mientras que en el caso de no existir dicha información se requiere la intervención del operador.

#### 4.3 Calibración de entornos remotos semiestructurados.

La ejecución de comandos de alto nivel depende del conocimiento que se tenga del entorno de trabajo. En las tareas de teleoperación suele ser habitual que los entornos remotos sean semiestructurados; es decir, que se conozcan los elementos sobre los que se va a trabajar, pero que se desconozcan sus localizaciones espaciales.

Para la calibración de entornos semiestructurados se ofrece al operador una aplicación de superposición de imágenes (Ferre et al., 2003). En la figura 9 se muestra cómo funciona dicha superposición. Esta aplicación le permite mezclar las imágenes que recibe de las cámaras de vídeo de las moléculas con una

simulación gráfica generada por la estación de control. Cuando la posición de los objetos reales coincide con la posición que estos tienen en la simulación gráfica, entonces se tiene una aproximación de cómo es el entorno remoto de trabajo de las moléculas. Esta es una calibración aproximada del entorno remoto, pudiendo existir errores de posicionamiento de los objetos del orden del centímetro. Este grado de precisión es suficiente para enviar órdenes de desplazamiento a las moléculas, ya que esta información se utiliza para evitar obstáculos; sin embargo, la precisión con que se conoce la posición de los objetos puede ser insuficiente para manipularlos, en ese caso se requiere una calibración más exacta.

Cuando se requiere una calibración más precisa entonces se precisa la intervención del operador. En este caso el procedimiento utilizado consiste en el guiado de una molécula por parte del operador de forma que la molécula sirva para referenciar los puntos más significativos del entorno de trabajo. Esto implica que el sistema de referencia del entorno coincida con algún punto fijo de la molécula, y la posición de los objetos del entorno se referencian en base a los movimientos de dicha molécula. En este caso la precisión de los objetos viene dada por la precisión en los movimientos de los módulos, que es suficiente para las tareas de manipulación que se llevan a cabo. En caso de no poder calibrar el entorno entonces el operador necesita realizar la manipulación de forma teleoperada, ya que no se dispone de la información suficiente para manipular los objetos de forma automática.

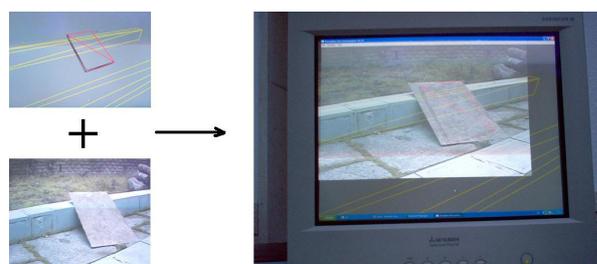


Figura 9. Superposición de imágenes para la calibración de entornos semiestructurados. En la izquierda, las dos imágenes que son mezcladas: simulación gráfica del entorno de trabajo e imagen de vídeo suministrada por las moléculas. En la derecha, el resultado de superponer ambas imágenes.

## 5. EJECUCIÓN DE TAREAS CON EL SISTEMA MODULAR ROBMAT

La ejecución de tareas complejas generalmente se logra con el encadenamiento de acciones más simples, en las que a veces se requiere la reconfiguración del sistema modular. La utilización de robots modulares para desplazamientos y telemanipulación hace necesario la implementación

de ciertos recursos para lograr un buen rendimiento del sistema. A continuación se describen los aspectos claves para la ejecución de una tarea de manipulación usando estos dispositivos.

### 5.1 Desplazamiento de la molécula base.

La tarea más simple pero a la vez una de las más utilizadas es la de desplazamiento. Prácticamente, la gran totalidad de los robots de servicio la precisan. Para permitir el desplazamiento de la molécula base se han incorporado unos electroimanes a las moléculas, de forma que uno de los módulos se fija a una superficie metálica cuando el otro módulo está en movimiento. En la figura 10 se muestra una secuencia del desplazamiento descrito.

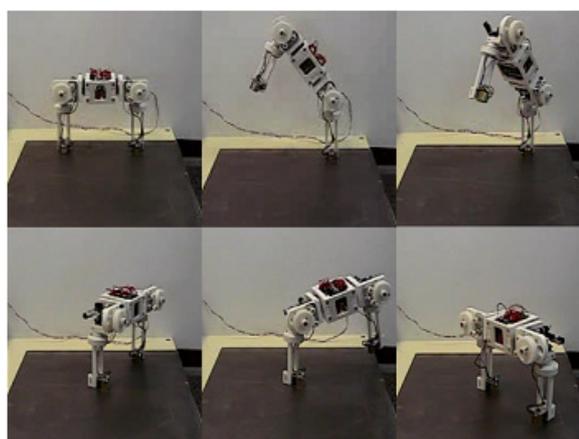


Figura 10. Secuencia de movimientos en el desplazamiento de la molécula base.

El guiado de este movimiento se realiza con el joystick a nivel de módulo, tal y como se describió en el apartado anterior. La estación de control captura los comandos que el usuario realiza sobre el joystick, y los envía al módulo maestro a través del enlace Bluetooth. El usuario controla independientemente los 3 gdl de cada módulo y mediante los pulsadores del joystick selecciona el módulo a guiar dentro de cada molécula. También hace uso de los selectores del joystick para la activación y desactivación de los electroimanes. La realimentación de información que se realiza al operador son imágenes de vídeo y reflexión de fuerza proporcional a la corriente de los motores. Este tipo de reflexión le informa sobre el par que está ejerciendo. En caso de alcanzar el límite articular se le realimenta un gran par para evitar que fuerce dicha articulación.

### 5.2 Reconfiguración de moléculas

Las moléculas base pueden combinarse para formar estructuras más complejas que permitan abordar las tareas de forma más eficiente. Esta tarea es la reconfiguración. Por ejemplo dos moléculas base pueden aproximarse hasta que se produzca el

contacto entre sus conectores de tal forma que puedan acoplarse. Una vez acopladas forman una estructura con cuatro módulos como muestra la figura 11.

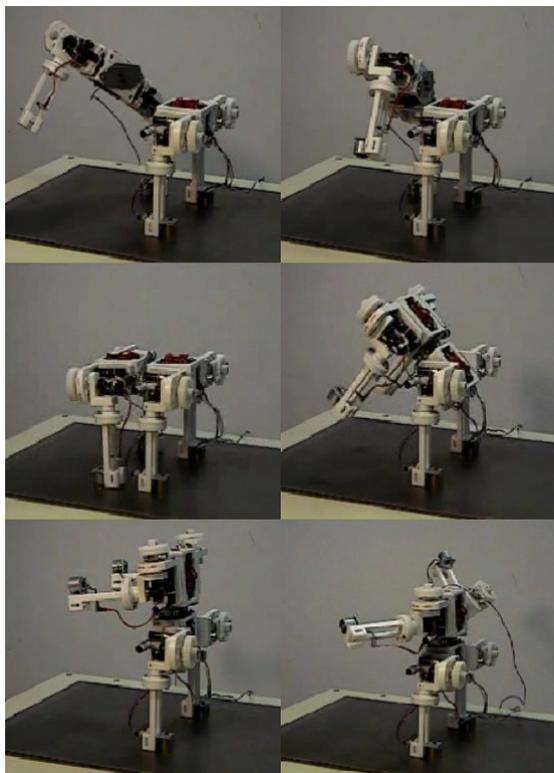


Figura 11. Secuencia de movimientos para la reconfiguración de dos moléculas base en una molécula compleja.

En las tres últimas imágenes de esta secuencia se ve como la molécula base que se encuentra apoyada eleva a la otra. Para este movimiento aparentemente tan simple se precisa que los movimientos estén sincronizados. Por tanto, a medida que la complejidad de las moléculas aumenta, también lo hacen los movimientos a realizar, siendo insuficiente el movimiento desacoplado entre módulos para la ejecución de tales movimientos.

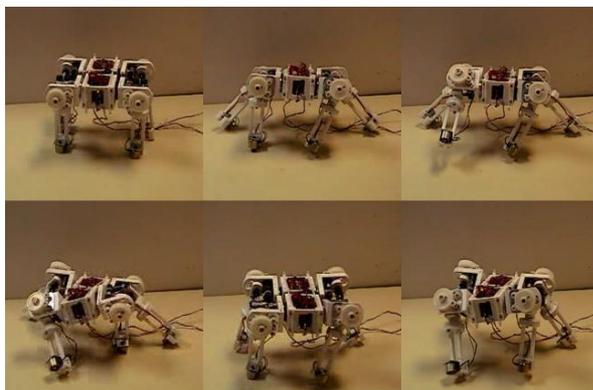


Figura 12. Secuencia de fotogramas del movimiento de avance de una molécula compuesta por cuatro módulos.

Tal y como se muestra en la figura 12, una molécula compuesta por cuatro módulos permite el desplazamiento por casi cualquier superficie sin la necesidad de los electroimanes. Sin embargo, el control de la molécula se complica. Antes del acoplamiento se tiene el movimiento de moléculas base, las órdenes del usuario se gestionan como se describió en el apartado anterior. Una vez que se obtiene la molécula de cuatro módulos el control es diferente. Para el movimiento del cuadrúpedo, se utilizan patrones de movimiento en todos los módulos, dichos patrones contienen tablas con la referencia angular de cada eje que describen secuencias de movimiento compuesto como: avanzar, retroceder o girar. Con el joystick se gobierna la dirección y velocidad del movimiento de la molécula. Para la obtención de los patrones se cuenta con un simulador, MAVES (Escalera et al., 2002) donde el usuario prueba diferentes estrategias de movimiento hasta que alcanza el movimiento deseado. Entonces se guarda el patrón que se utilizará cuando se tenga esa configuración.

Como se observa, en esta configuración el control ya no se produce a nivel de módulo, sino que se controla la molécula en su conjunto. Un punto crítico para el correcto funcionamiento es la sincronización de los módulos.

### 5.3 Desplazamiento y manipulación en exteriores

La combinación de acciones simples como las que se han descrito anteriormente permiten la realización de tareas más complejas. Además, la arquitectura implementada permite que varias moléculas puedan cooperar en la realización de tareas. El experimento que se presenta a continuación involucra tres moléculas base. Inicialmente, las tres forman parte de una misma molécula configurándose como un hexápodo. Bajo esta forma se desplazan para aproximarse al entorno de trabajo. La molécula es guiada con la referencia de la imagen que envían las mini-cámaras que tiene la molécula base a la cabeza del hexápodo. Una vez allí, esta molécula base se separa y el usuario la dirige hacia un lugar desde donde pueda captar el entorno remoto convenientemente. La molécula restante queda pues configurada con cuatro módulos.

Al igual que antes el usuario la dirige al lugar de trabajo donde se separan las dos moléculas base y comienza el desarrollo de la tarea de manipulación. Ambas moléculas base se encuentran sobre una superficie metálica donde colaboran en una tarea sencilla basada en pasarse una chapa metálica. Hay que resaltar que la tarea está teleoperada haciendo uso de la estación de control y el interfaz con el maestro para manejar la molécula. Para el desarrollo es imprescindible que los comandos de joystick se refieran al movimiento de la molécula, ya que en caso contrario se precisaría un joystick por módulo, lo cual complicaría la ejecución de las tareas y el puesto de

control. La tercera molécula aporta la ayuda indispensable para llevar a cabo la operación, se trata de la imagen 3D del entorno de trabajo. En la figura 13 se observan varias tomas durante el desarrollo de la tarea.

Los resultados de los experimentos realizados ponen de manifiesto el interés que tiene que la actuación del operador sea relativa a la molécula y no al módulo. A su vez, conviene destacar que el control a nivel de molécula implica que exista una correcta coordinación entre los módulos, como se describió en el apartado anterior, y que el guiado no provoque cambios bruscos en las referencias, lo cual se consigue mediante el interpolador citado anteriormente; ya que este permite obtener un perfil adecuado de velocidades y aceleraciones, garantizando la continuidad de los movimientos cuando se guían las moléculas.

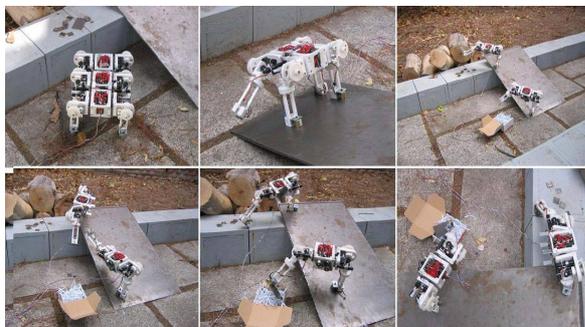


Figura 13. Secuencia de fotogramas del movimiento de avance de una molécula compuesta por cuatro módulos.

## 6. CONCLUSIONES

El trabajo realizado en el proyecto RobMAT ha puesto de manifiesto la potencia y versatilidad de los robots modulares autoconfigurables. Se ha descrito una arquitectura basada en moléculas, que están compuestas por módulos, y que disponen de toda la funcionalidad de un robot. Estas moléculas son las encargadas de la ejecución de las tareas y su configuración se adapta a la etapa de la tarea en curso. Los módulos tienen 3 gdl y disponen de un controlador para la ejecución de trayectorias y la comunicación con el exterior. Los módulos son controlados remotamente por un operador, el cual puede guiarlos manualmente o enviar comandos de alto nivel relativos al trabajo a realizar.

La ejecución de tareas pone de manifiesto la ventaja que ofrecen las moléculas complejas para el desplazamiento, mientras que durante la manipulación esta estructura se transforma en varias moléculas más simples que presentan mayores ventajas para la manipulación de elementos. Así mismo, se ha puesto de manifiesto la gran utilidad que tienen los mecanismos de sincronización e interpolación de trayectorias desarrollados, para que

las moléculas realicen sus movimientos correctamente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida por la CICYT para la realización de este trabajo de investigación. El proyecto RobMAT ha sido financiado dentro del programa de Diseño y Producción Industrial (DPI2003-00759).

## REFERENCIAS

- BT. Página web oficial del consorcio Bluetooth (2007). <https://www.bluetooth.org/>.
- CAN. Especificación de la versión 2.0 (1991). <http://www.wisc.edu/writest/Handbook/DocAPA.html>.
- Castano, A., Behar, A., and Will, P. M. (2002). The CONRO modules for reconfigurable robots. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7: p. 403–409.
- Chow, A., and Johnson, T. (1997). Distributed Operating Systems and Algorithm Analysis. Addison-Wesley.
- Escalera, J., Saltaren, R., Aracil, R., Ferre, M., and García, C. (2005). Base molecule design and simulation of a modular robot robmat. In: Proceeding of 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic.
- Escalera, J.A., Ferre, M., Saltarén, R., and Aracil, R. (2005). Diseño y Construcción del Robot Modular Robmat. In: XXVI Jornadas de Automática. Alicante.
- M. Ferre, R. Aracil, M. Navas and J. A. Escalera (2003) Real time video image processing for teleoperation: Image Blending and stereoscopy. In Proc. of 9th IEEE Int. Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, p: 539–544.
- Ferre, M., Aracil, R., and Navas, M. (2005). Stereoscopic video images for telerobotic applications. Journal of Robotic Systems, 22(3): p. 131–146.
- Fukuda, T. and Kawauchi, Y. (2004). Cellular robotic system(cebot) as one of the realization of self-organizing intelligent universal manipulator. In: Proceedings of IEEE/RJS International Conference on Robots and Systems.
- Gross, R., Bonani, M., Mondada, F., and Dorigo, M. (2005). Autonomous self-assembly in swarm-bots. IEEE Transactions on Robotics, p: 314–322.
- Jorgensen, M., Ostergaard, E., and Lund, H. (2004). Modular atron: Modules for a selfreconfigurable robot. In: Proceedings of IEEE/RJS International Conference on Robots and Systems.
- Kotay, K., Rus, D., Vona, M., and McGray, G. (1998). The self-reconfiguring robotic molecule: Design and control algorithms. En: Proceedings

- of IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Kurokawa, H., Kamimura, A., Yoshida, E., Tomita, K., Murata, S., and Kokaji, S. (2002). Self-reconfigurable modular robot (m-tran) and its motion design. In: Proceedings of 7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'02).
- Lipson, H., White, P., Zykov, V., y Bongard, J. (2005). 3D stochastic reconfiguration of modular robots. In: Workshop on Self-reconfigurable Robotics at the Robotics Science and System.
- McKee, G. T. and Schenker, P. S. (2000). Networked robotics. In: SPIE Proceedings on Sensor Fusion and Decentralised Control in Robotics Systems III, p. 197–209, Boston.
- Murata, S., Kurakawa, H., Yoshida, E., Tomita, K., y Kokaji, S. (1998). A 3-D selfconfigurable structure. En: Proceedings of 7th International Conference on Robotics and Automation.
- Murata S., Yoshida E., Kamimura A., Kurokawa H., Tomita K. and Kokaji S. (2002). M-TRAN: Self-Reconfigurable Modular Robot System. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 7 (4), p: 431-441.
- Navarro-Serment, L., Grabowski, R., Paredis, C., and Khosla, P. (2002). Millibots: The development of a framework and algorithms for a distributed heterogeneous robot team. In: IEEE Robotics and Automation Magazine, 9 (4).
- Pamecha, A., Chiang, C.-J., Stein, D., and Chirikjian, G. (1996) Design and implementation of metamorphic robots, In: ASME Design Engineering Technical Conference and Computers Engineering Conference, Irvine, CA.
- Rus D. and Vona, M., (2001) Crystalline robots: Self-reconfiguration with compressible unit modules, *Autonomous Robots*, 10, p. 107–124.
- Shen, W.-M., Krivokon, M., Chiu, H., Everist, J., Rubenstein, M., and Venkatesh, J. (2006). Multimode locomotion for reconfigurable robots. *Autonomous Robots*, 20(2): p. 165–177.
- Tomita, K., Murata, S., Kurokawa, H., Yoshida, E., and Kokaji, S. (1999) Selfassembly and self-repair method for a distributed mechanical system. In: IEEE Transaction on Robotics and Automation, 15, p. 1035–1045.
- Unsal, C., Kiliccote, H., and Khosla, P. (2001). A modular self-reconfigurable bipartite robotic system: Implementation and motion planning. *Autonomous Robots*, 10(1):23–177.
- Xu, J. (1990). Load Balancing Methods for Message-Passing Multicomputers. Computer Science Department: University of Southern California.
- Yim, M., Duff, D., and Roufas, K. D. (2002). Walk on the wild side. In: IEEE Robotics & Automation Magazine, 9 (4), p. 49–53.