

Capítulo 2

Encuadre científico-tecnológico

”Estamos, naturalmente, sólo en el principio del principio de la revolución robótica.”

– Isaac Asimov

2.1. Introducción

En este capítulo estudiaremos la evolución en la última década de dos tipos de robots: **los ápodos** y **los modulares**. Haremos hincapié en los prototipos creados recientemente y veremos desde una perspectiva general dónde encaja esta tesis y sus aportaciones.

Primero introduciremos **el problema de la locomoción** y algunas ideas previas. Continuaremos con la evolución y el estado del arte de **los robots ápodos** y **ápodos autopropulsados** que se han desarrollado en los centros de investigación internacionales más prestigiosos. A continuación presentaremos los avances en una nueva rama de investigación en robótica conocida como **la robótica modular**. Las investigaciones actuales se centran tanto en la locomoción de estos robots como en sus capacidades para formar diferentes estructuras. Finalizaremos esta parte **estableciendo una clasificación** que engloba tanto a los robots ápodos como a los modulares.

En la segunda parte presentaremos **el problema de la coordinación** y los diferentes enfoques para su resolución, centrándonos en los robots ápodos y modulares.

2.2. Locomoción

2.2.1. Niveles en la locomoción

La locomoción es la capacidad que tienen los seres vivos pertenecientes al reino animal que les permite trasladarse voluntariamente de un lugar a otro. Es una de las características diferenciadoras de los animales con respecto a las plantas. Hay dos aspectos importantes a tener en cuenta: el **control** y la **voluntariedad**. Para que el movimiento sea considerado locomoción el individuo tiene que querer realizarlo y además controlarlo. Así, los nenúfares que reposan sobre la superficie del agua se mueven por las corrientes o la acción de otros animales, pero no se considerará locomoción ya que no son voluntarios ni controlados.

El estudio de la locomoción se divide en dos niveles, que denominaremos nivel inferior y superior. El **nivel inferior** es el encargado del control y la coordinación de los músculos (o actuadores en el caso de los robots) para que el individuo pueda desplazarse. Engloba también los diferentes tipos de maneras de desplazarse que se pueden lograr (giros, desplazamiento en línea recta, desplazamiento lateral, etc). Las preguntas que se resuelven en este nivel son: ¿Cómo me desplazo? ¿Cómo coordino todos los músculos (actuadores) para lograr la locomoción?

El **nivel superior** se encarga de la planificación de trayectorias, navegación y otras tareas de mayor nivel. Está relacionado con la voluntariedad. Las preguntas que definen este nivel son: ¿Dónde quiero ir? ¿Qué camino seguir?

En esta tesis nos centraremos en el nivel inferior de la locomoción, estudiando los mecanismos para que los robots ápodos puedan desplazarse.

2.2.2. Tipos de locomoción

En la naturaleza, la locomoción de los animales se ha adaptado al medio en el que viven. Se puede realizar una primera clasificación según el medio en el que se desplazan. Así, la locomoción puede ser: aérea, acuática o terrestre. Esta clasificación no es excluyente. Los mamíferos terrestres son capaces también de desplazarse cortas distancias por el agua, por ejemplo para cruzar un río. En este caso utilizan un modo de caminar (*gait*) diferente, que les permite nadar.

La locomoción terrestre se puede dividir a su vez en dos categorías, según los órganos empleados para realizar el desplazamiento: **locomoción mediante patas** (mamíferos, insectos) o mediante **movimientos corporales** (serpientes, orugas, lombrices).



Figura 2.1: Ejemplos de robots con diferentes efectores para la locomoción terrestre

2.2.3. Locomoción de robots

Una de las áreas de investigación en robótica es la locomoción: dotar a los robots de capacidades locomotivas para que puedan trasladarse de un lugar a otro. Estos robots reciben el nombre genérico de **robots móviles**. A su vez, el estudio de la locomoción se realiza en los dos niveles mencionados en los apartados previos. En las investigaciones del nivel superior se parte de que el robot puede desplazarse, haciéndose abstracción de los mecanismos para que sea posible (patas, ruedas...) y se centra en las tareas de alto nivel de navegación, planificación de trayectorias, visión, cooperación, etc.

Al igual que sucede con los animales, en el estudio del nivel inferior de la locomoción se pueden clasificar los robots según los efectores empleados para su desplazamiento: **ruedas, orugas, patas** o el **cuerpo**. Bajo el término **robots ápodos** quedan englobados aquellos robots, que igual que sus homólogos en la naturaleza, realizan la locomoción mediante movimientos corporales. Estos son las cuatro categorías clásicas para el estudio de la locomoción, sin embargo la clasificación no es cerrada y como apuntó Mark Yim[160] en su tesis doctoral, pueden aparecer nuevos efectores que no entren en ninguna de esas categorías. Tal es el caso de los *whegs*[112] y su versión *mini-whegs*[100], creados por Quinn et al. en el laboratorio de biorrobótica de la *Case Western Reserve University*. Son una mezcla entre rueda y pata que está dando unos resultados muy interesantes. En la figura 2.1 se muestran fotos de robots que usan diferentes efectores para realizar la locomoción: Ruedas, orugas, *Whegs*, el cuerpo y cuatro, seis y ocho patas.

Los temas de investigación en el nivel inferior de la locomoción son las propiedades de los diferentes efectores, cómo realizar la coordinación de los actuadores, los diferentes modos de caminar, algoritmos de control, etc. En lo que resta de capítulo al hablar de locomoción nos referiremos siempre al nivel inferior.

2.2.4. Diseño de robots móviles

Lo mismo que ocurre en el reino animal, donde la locomoción de los individuos está especialmente adaptada al entorno en el que normalmente se desenvuelven, para el diseño de un robot móvil es esencial conocer el terreno por el que se va a desplazar. Es **el entorno** el elemento clave en la decisión de qué efectores elegir y qué tipos de modo de caminar implementar. Así por ejemplo, si el robot se va a desplazar por superficies lisas donde no existe la necesidad de superar obstáculos, bastará con utilizar ruedas o a lo sumo orugas.

El proceso de diseño se podría resumir en los siguientes pasos:

1. Estudiar el entorno en el que se va a desplazar el robot
2. Seleccionar los efectores

3. Implementar los modos de caminar

Estos pasos son muy críticos. Una mala elección a este nivel, implicaría tener que volver a reconstruir el robot. Esta es la razón por la que las investigaciones a este nivel son tan importantes: cuanto mejor se conozcan las propiedades de los efectores, los modos de caminar posibles, la eficiencia de cada modo de caminar, etc, mayor serán los datos disponibles para tomar una decisión de diseño correcta. Leger[81] abordó en su tesis doctoral el problema del diseño automático de robots, utilizando un enfoque evolutivo. Su idea central es que el espacio de búsquedas de soluciones al problema de la locomoción es tan amplio que son necesarias herramientas que permitan explorar la mayor cantidad posible de ellas antes de tomar una decisión de qué diseño implementar. Un error en la configuración del robot a este nivel es muy crítico. Por ello propuso utilizar algoritmos evolutivos para ayudar a los diseñadores en esta etapa.

Sin embargo, existen aplicaciones en las que es difícil conocer a priori y con detalle el terreno, por lo que hay mucha incertidumbre en la etapa inicial de diseño. Tal es el caso del diseño de robots para las **operaciones de búsqueda y rescate o la exploración de planetas**. Debido a ello, el robot tiene que tener la **máxima versatilidad** posible. Las investigaciones se centran en estudiar los efectores más versátiles y los diferentes modos de caminar posibles.

2.2.5. El problema de la locomoción

Uno de los grandes retos es el de desarrollar un robot que sea capaz de moverse por cualquier tipo de entorno por muy escarpado y complicado que sea. Es decir, un robot con una gran versatilidad. Esto tiene especial interés en las aplicaciones en las que el entorno no es lo suficientemente conocido o es cambiante, como en la exploración de las superficies de otros planetas, exploración en entornos hostiles o operaciones de búsqueda y rescate. ¿Qué es mejor utilizar, patas, rudas, orugas...? ¿Qué número de patas? ¿Qué tipo de movimiento? ¿Qué configuración de las patas si es que las tiene?

La Nasa está especialmente interesada en este problema, financiando proyectos destinados a la construcción y evaluación de alternativas para que los robots se puedan desplazar en entornos escarpados. Dos de estos proyectos en la etapa inicial (finales de los ochenta) fueron el *CMU Ambler*[75] y el *Dante II*[3]. Son dos ejemplos que ilustran el modelo de diseño descrito en el apartado anterior: diseños de estructuras específicas a partir de las especificaciones del entorno.

El *Ambler* es un robot autónomo para la exploración de planeta, pensado para moverse por la superficie de Marte. A partir de las especificaciones se diseñó el robot, dotado de 6 patas, 3.5m de altura y un peso de 2.500Kg. El tipo de locomoción seleccionado fue mediante patas, es el que presenta mayor eficiencia teórica[3]. Sin embargo, este robot nunca fue enviado a Marte. Para cumplir con los requisitos, las dimensiones y peso del robot son excesivamente grandes. A parte de que el consumo de potencia es muy alto.

El Robot *Dante II* se diseñó también para explorar terrenos escarpados y se probó en 1994 para la exploración del volcán del monte *Spurr* en Alaska. En este caso, el robot poseía 8 patas con un sistema de locomoción denominado *framewalker*. A pesar de que se conocían las especificaciones del terreno, que el robot poseía un cable que lo mantenía enganchado a la cima y por el que iba descendiendo, al quinto día volcó y no pudo ser recuperado.

Para la exploración de Marte, la Nasa se decantó por la utilización de ruedas[83] ya que hasta el momento han dado muy buenos resultados. Sin embargo, las rudas son muy limitadas. Sólo permiten que el robot se pueda desplazar por entornos muy controlados. Es una de las razones por las que es necesario planear con mucha antelación y cuidado el lugar al que se enviarán los robots, no sólo teniendo en cuenta el interés en la recolección de datos científicos, las condiciones atmosféricas... sino también que los robots puedan desplazarse correctamente por el terreno[36]. Esto es una gran limitación.

Inspirados por las impresionantes capacidades locomotivas de los animales con patas, Dirk Spennberg et al. de la Universidad de Bremen desarrollaron el robot *Scorpio*[26], de 8 patas, capaz de moverse por terrenos arenosos y rocosos, en lugares donde las ruedas no lo consiguen. Este proyecto fue financiado por el DARPA y el robot se propuso como una alternativa para la exploración de Marte. Motivados por los resultados, comenzaron el desarrollo de *ARAMIES*[134], un robot cuadrúpedo que pueda moverse por terrenos extremadamente adversos y que además pueda llevar a bordo experimentos científicos. Uno de los objetivos es explorar las capacidades locomotivas de los robots cuadrúpedos en este tipo de entornos.

2.3. Robots ápodos

Frente a la locomoción terrestre mediante patas, están los seres vivos que utilizan movimientos corporales. Los robots que utilizan este tipo de desplazamiento los denominaremos **robots ápodos**. El término ápodo significa “carente de patas”.

Estos robots tienen unas características que los hacen únicos, al igual que sus homólogos las serpientes y gusanos. Por un lado está su capacidad para cambiar su forma. Frente a las rígidas estructuras del resto de robots, los ápodos pueden doblarse y adoptar la forma del terreno por el que se desplazan. Por otro lado, su sección es muy pequeña en comparación con su tamaño, lo que les permite introducirse por tubos u orificios pequeños y llegar a lugares donde otros robots no pueden.

En este apartado analizaremos los robots ápodos creados en los centros de investigación más importante y su evolución hasta nuestros días.



Figura 2.2: Evolución de los robots serpiente de la familia ACM (*Active Cord Mechanism*). Hirose-Fukushima Robotics Lab

2.3.1. Instituto de tecnología de Tokyo: Familia ACM

El pionero en el estudio de la biomecánica de las serpientes para su aplicación a la robótica fue Hirose, del Instituto de tecnología de Tokyo, que implementó en 1976 el primer robot de tipo serpiente denominado **ACM-III** (*Active Cord Mechanisms*). Los resultados de sus investigaciones han sido recopilados y publicados en 1987 en el libro de referencia “*Biologically Inspired Robots*”[48].

Una de las mayores aportaciones a la ciencia del profesor Hirose fue el descubrimiento y formulación de la **curva serpentinoide**[147], que es la forma que adoptan las serpientes durante su desplazamiento. Propuso un modelo de vértebra que se mueve mediante la acción de dos músculos opuestos modelados por dos muelles que provocan un movimiento senoidal. A continuación formuló la ecuación de la curva que forma la espina dorsal y finalmente la comparó con los resultados experimentales obtenidos a partir de serpientes reales.

En la figura 2.2¹ se muestran los diferentes prototipos desarrollados hasta el momento. El primero es el **ACM-III** que mide 2m de largo y está formado por 20 articulaciones que se mueven paralelamente al suelo (*yaw*), capaz de moverse a una velocidad de 40cm/s. Cada módulo está dotado de unas ruedas pasivas que permiten al robot deslizarse por el suelo. Estas ruedas hacen que el coeficiente de rozamiento en la dirección tangencial sea muy pequeño frente al normal. Es este principio el que permite la propulsión del robot cuando las articulaciones se hacen oscilar adecuadamente. Este

¹Más información en la web: http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/snake_e.html

mecanismos lo bautizaron como propulsión de deslizamiento (*glide-propulsion*) y no sólo es similar al de las serpientes, sino también a cómo se deslazan los patinadores.

El prototipo ACM-III se adelantó unos 20 años a su tiempo. Esta línea de investigación quedó olvidada hasta que, debido a la aparición de la robótica modular, volvieron a aparecer prototipos de robots serpiente. Hirose y sus colaboradores retomaron el interés en estos sistemas y los rediseñaron con las nuevas tecnologías. Así nació el **ACM-R1**[49]. Una revisión del ACM-III, pero más moderno. Se incluyó comunicación inalámbrica con el robot para eliminar la necesidad de los cables. Este prototipo tiene 16 módulos y puede moverse a una velocidad de unos *50cm/s*. Los módulos son más pequeños y con un mejor acabado. Entre los nuevos experimentos realizados destaca la comprobación de la propulsión de deslizamiento en el hielo, utilizando el mismo tipo de cuchillas usadas en los patines de hielo[29].

El siguiente prototipo, **ACM-R2** tiene un grado más de libertad en cada módulo permitiendo el cabeceo (*pitch*) además del viraje (*yaw*)[146] lo que permite que el robot adopte formas en tres dimensiones. Este prototipo sirvió principalmente para estudiar la viabilidad de los robots con ejes de cabeceo y viraje, y luego evolucionó hasta el **ACM-R3**[98]. La funcionalidad del ACM-R3 es la misma que la del ACM-R2, sin embargo el diseño es completamente nuevo. Ahora cada módulo sólo tiene un grado de libertad. Y está diseñado de manera que al conectarlos en cadena quedan alternados los movimientos de cabeceo y viraje. La estructura es mucho más compacta y ligera que la de su predecesor. Una de las novedades de este diseño fue el integrar unas ruedas pasivas de gran tamaño, a ambos lados del módulo. Este novedoso diseño permite que las ruedas siempre estén en contacto con el suelo, independientemente de la orientación el robot permitiéndole propulsarse en posiciones inclinadas. El prototipo se utilizó para investigar en nuevas formas de locomoción como rodar (*rolling*), *sinus-lifting* o movimientos inclinados[99].

Con la idea de mejorar el modelo para poder hacer que funcione en situaciones reales, donde hay polvo, agua, zonas de muy difícil acceso, etc, se desarrolló el **ACM-R4**[157]. Se puede considerar como una versión industrial que puede ser usado para tareas de inspección o búsqueda, bien en tubos o en zonas muy escarpadas. La propulsión de tipo serpiente requiere de muchos módulos. Con la idea de reducir el tamaño, las ruedas que antes eran pasivas ahora son activas y pueden ser actuadas por un motor. El ACM-R4 tiene sólo 9 módulos. Esta característica hace que aparezcan nuevas capacidades locomotivas. En uno de los experimentos se puede ver cómo el robot que avanza por el suelo, levanta su cuerpo, se apoya en una silla, se mueve sobre ella y finalmente vuelve a bajar, demostrando que puede moverse por terrenos bastante complicados.

Una característica de las serpientes es que se pueden mover tanto por tierra como por agua. A partir de ACM-R4 y de un prototipo de robot anfibio, **Helix**[142] nació la siguiente versión **ACM-R5**[156]. El robot puede desplazarse por la tierra utilizando propulsión de deslizamiento, mediante unas pequeñas ruedas pasivas. Además, cada módulo dispone de 4 aletas fijas que en el desplazamiento por el agua la resistencia a movimientos normales sea alta y para los tangenciales baja.

2.3.2. Instituto de automática de ShenYan

Los trabajos de Hirose han servido de inspiración para otros investigadores. Uno de ellos es Shugen Ma que repitió y amplió los trabajos de Hirose sobre la propulsión deslizante y desarrollaron una versión simplificada del ACM-R1 de 12 módulos mecánicamente menos complejos y con un sistema de control mejorado[85]. Además, desarrollaron un *software* para simular el movimiento real del robot en diferentes superficies. En la teoría se supone que el robot se mueve a lo largo de la curva serpentina y que no existe deslizamiento normal a la trayectoria. Sin embargo, en la práctica sí que aparece este deslizamiento lateral, que causa pérdidas en la fuerza de propulsión. Por medio del simulador es posible determinar los valores de las pérdidas y conocer el ángulo de serpiente óptimo para cada superficie [86]. En trabajos posteriores, estudiaron la locomoción del mismo robot cuando el terreno está inclinado[88].

El mismo grupo del profesor Shugen Ma, en paralelo, comenzó a estudiar los robots ápodos con conexiones del tipo cabeceo-viraje[87] (ver apartado siguiente). Desarrollaron un módulo dotado de un grado de libertad y actuado por un servo y con él crearon configuraciones de robots para el estudio de diferentes movimientos y su adaptación al medio. En concreto, propusieron el movimiento de rodar (*rolling*) para la superación de obstáculos[11], y en[10] estudiaron el problema de una manera más general, proponiendo otros tipos de movimiento en función del entorno.

2.3.3. Instituto de Robótica de Carnegie Mellon University

En el instituto de Robótica del CMU (*Carnegie Mellon University*), Kevin Downing estudió los robots ápodos y desarrolló en su tesis doctoral[27] un entorno de trabajo para la generación automática de modos de caminar de las serpientes robóticas, con financiación de la NASA. Fue uno de los pioneros en aplicar algoritmos genéticos para encontrar soluciones de locomoción en estos robots.

Las investigaciones sobre robots de tipo serpiente se están llevando a cabo en el laboratorio de biorrobótica² dirigido por el profesor Howie Choset. Las principales líneas de investigación son en mecánica y en la locomoción, tanto del nivel inferior como del superior. En la parte mecánica están desarrollando nuevas articulaciones[126] para la realización de serpientes en 3D así como actuadores que permitan trepar de una manera más óptima[24].

En el nivel superior sus investigaciones se centran en la planificación de los movimientos, desarrollando algoritmos de locomoción y posicionamiento en lo que denominan robots hyperredundantes [16][15].

En el área de la locomoción a bajo nivel están obteniendo unos resultados muy interesantes. Los vídeos de los robots se pueden ver en su canal de *YouTube*³. Los prototipos diseñados (ver Figura 2.3) están basados en los módulos de Mark Yim, descritos con más detalles en la sección 2.5.

²<http://download.srv.cs.cmu.edu/~biorobotics/>

³Canal en YouTube: <http://www.youtube.com/user/CMUBiorobotics>

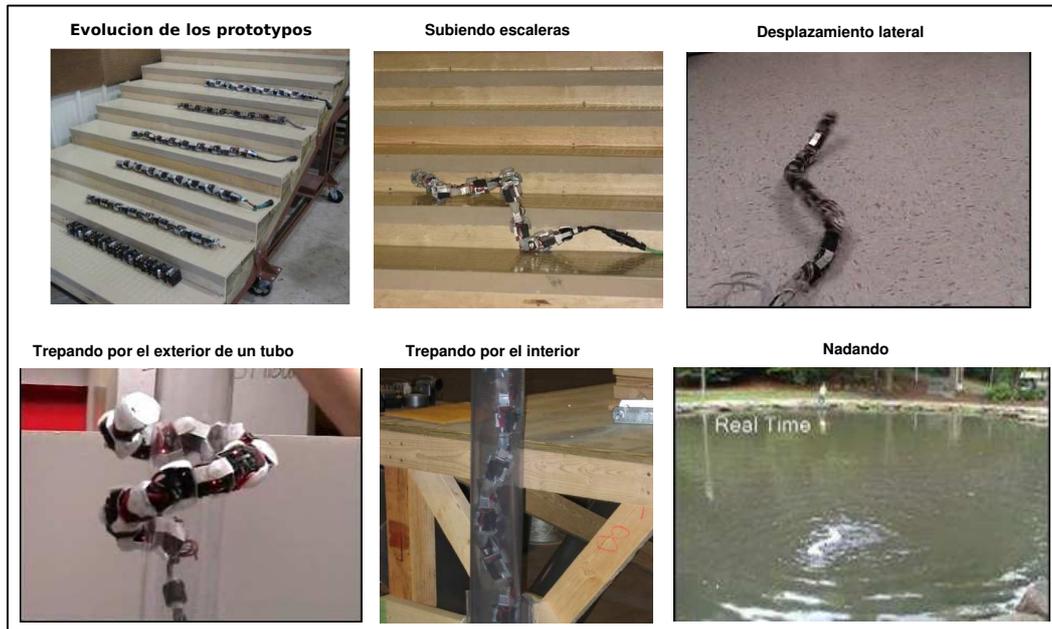


Figura 2.3: La serpiente robótica del CMU

Utilizan módulos de aluminio, de un grado de libertad, actuado por lo que denominan un Super-servo. Son servos comerciales que han “trucado”, añadiendo su propia electrónica, sensores y bus de comunicaciones[155]. Utilizan distintos tipos de “pieles” para recubrir los módulos y permitir que la serpiente se pueda mover por todo tipo de terrenos, incluso en medios acuáticos.

Los últimos prototipos constan de 16 módulos y pueden desplazarse en línea recta, lateralmente, trepar por el exterior e interior de un tubo, nadar y rodar[84]. En este nivel bajo de locomoción, los robots son telecontrolados por un operador, que indica en cada momento qué movimientos debe realizar el robot.

2.3.4. Grupo de robótica bioinspirada del EPFL: Amphibot

El grupo de robótica bioinspirada del EPFL (*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*) ha desarrollado el robot anfibio **Amphibot**[21]⁴, que es capaz de moverse por agua y tierra. Está compuesto de 8 módulos que se mueve paralelamente al suelo y utiliza modelos de control bioinspirados para la locomoción, basados en los modelos de CPGs (*Central Pattern Generators*) de la lamprea, desarrollados por Ijspeert [60].

El primero prototipo, **Amphibot-I**[22][20] podía nadar mediante ondulaciones de su cuerpo, así como desplazarse por tierra como las serpientes, para lo que incluía unas rudas pasivas situadas en la panza, similares a las del ACM.

⁴Más información disponible en la web: <http://birg.epfl.ch/page53468.html>



Figura 2.4: Los prototipos amphibot I y II del grupo de bioinspirada del EPFL. En la parte inferior izquierda el autor de esta tesis está junto a Alexander Crespi, autor de Amphibot, durante la asistencia al Clawar 2006 en Bruselas.

En la segunda versión, **AmphiBot II**[23], los módulos se hicieron más compactos y añadieron patas. Este robot además de nadar puede moverse por tierra de forma similar a como lo hacen las salamandras, combinando los movimientos corporales con las patas. Para el modelo de control utilizan los modelos de los CPGs de la lamprea y muestran cómo se puede ajustar fácilmente la velocidad y dirección del movimiento tanto en el movimiento en tierra como en agua[59].

2.3.5. Otros

Una de los robots serpientes más realistas logrados es el prototipo **S5**⁵ de Miller[93] constituido por 64 articulaciones y la relación entre longitud y anchura de la sección se acerca mucho a la de las serpientes reales. Es la quinta generación de robots serpientes diseñados.

El **WormBot**⁶ de Conrad et al.[19], desarrollado en el Instituto de Neuroinformática de la Univesidad de Zurich, es un prototipo de serpiente robótica que se mueve mediante ondulaciones de su cuerpo y que se basa en un modelo bioinspirado de CPGs. Han implementado el CPGs de la Lamprea[18]. El robot es autónomo y un operador puede cambiar los parámetros de acoplamiento entre los osciladores.

Un planteamiento diferente se emplea en el robot **SES-1** y **SES-2** (*Self Excited Snake Robots*) desarrollados por Ute et al[149] en el Instituto de Tecnología de Tokyo. El movimiento se consigue mediante el principio de auto-excitación, en un prototipo de 3 segmentos y 2 motores. Según este principio, existen muelles en paralelo con los actuadores y el par de cada motor se realimenta negativamente al ángulo del motor adyacente. Con este principio consiguen movimientos muy rápidos y eficientes. La primera versión SES-1 está formada por circuitos analógicos exclusivamente.

⁵Más información en la web: <http://snakerobots.com/>

⁶<http://www.ini.ethz.ch/~conradt/projects/WormBot/>

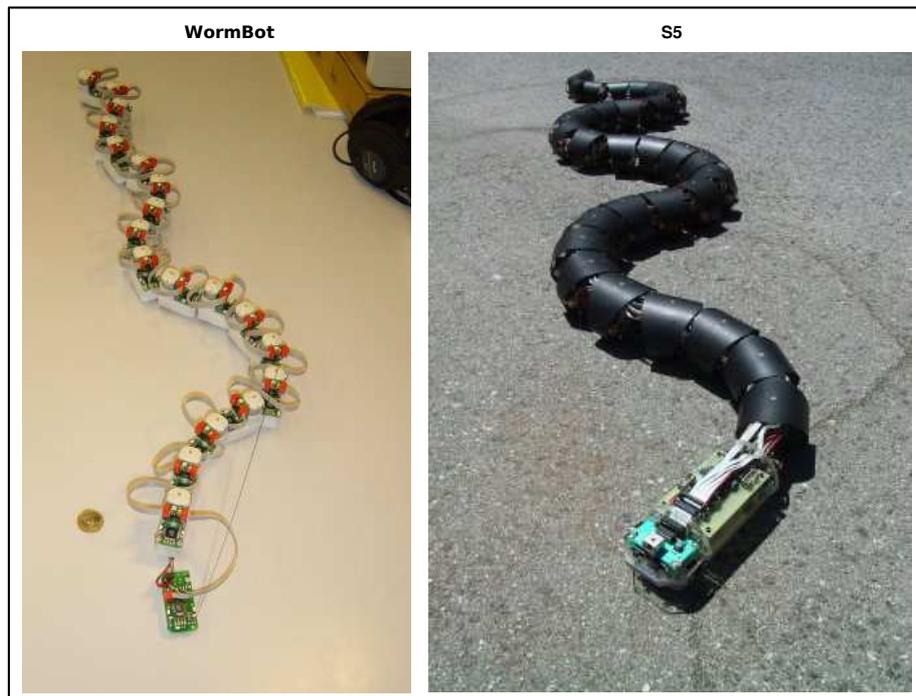


Figura 2.5: Izquierda: Wombot, diseñado por Conrad[19]. Derecha: S5, Miller[93]

En la figura 2.5 se muestran los prototipos de Wormbot y S5.

2.4. Robots ápodos propulsados

Frente a los robots ápodos que realizan la locomoción a partir de movimientos corporales están los robots ápodos autopropulsados en los que las diferentes partes que forman el robot tienen ruedas o orugas para conseguir el desplazamiento. Aunque tienen la forma de una serpiente, no se trata de robots bioinspirados. Este tipo de locomoción no se encuentra en la naturaleza. Sin embargo se incluyen en este estudio por ser la mayoría de ellos robots modulares, constituidos mediante la unión de cadena de módulos similares.

2.4.1. Hirose Fukushima Robotics Lab (Titech)

El profesor Hirose fue también pionero en este tipo de robots. A partir del ACM-III, desarrolló estructuras encadenadas con módulos autopropulsados[52], que denominó cuerpos articulados (*articulated bodies*)⁷. Entre las ventajas de este tipo de robots destacan su fácil transporte: los módulos se separan unos de otros y luego se vuelve a unir, pueden llevar carga distribuida por todo el robot, pueden

⁷Más información en el enlace: http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/snake_e.html

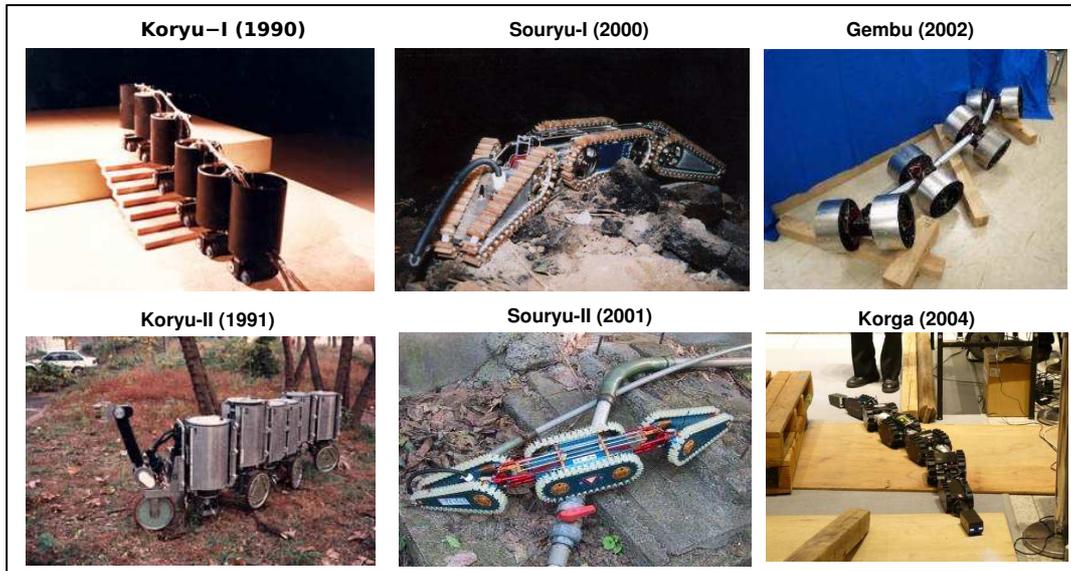


Figura 2.6: Robots auto-propulsados (*serpentine robots*) en el Hirose-Fukushima Robotics Lab

moverse por caminos estrechos y sinuosos y el sistema es redundante, si un módulo falla se sustituye por otro.

Para explorar las capacidades locomotivas de sus cuerpos articulados desarrollaron el prototipo **KORYU I**[53], formado por 6 cuerpos cilíndricos y propulsado mediante orugas. Cada módulo tiene 3 grados de libertad: movimiento vertical (eje z), movimiento de viraje (paralelo al plano xy) y las ruedas para la propulsión. Observaron que este robot puede girar, subir obstáculos e incluso escaleras. Los cilindros pueden también desplazarse verticalmente, lo que permite al robot moverse por terrenos irregulares. El segundo prototipo, **KORYU-II**[54] utiliza ruedas independientes en vez de orugas lo que le permite moverse por terrenos inclinados con facilidad. Realizaron experimentos tanto en el campo como en ciudad.

Los japoneses viven en una zona sísmica por lo los terremotos son muy frecuentes. Por ello las aplicaciones de búsqueda y rescate son de especial interés para ellos. Después de un terremoto, la gente puede quedar atrapada entre los escombros y hay que rescatarlo inmediatamente. Para ayudar sería interesante desarrollar un robot capaz de maniobrar en ese tipo de entorno y encontrar las víctimas o supervivientes usando cámaras y micrófonos.

El primer prototipo propuesto fue **Souryu-I**[141], compuesto por tres segmentos. Cada segmento está propulsado por orugas, pero no son independientes sino que existe un único motor que las mueve todas. El cuerpo frontal lleva una cámara y un micrófono y el trasero un receptor de radio. Los módulos de los extremos pueden realizar viraje y cabeceo de forma simétrica. El robot sólo tiene 3 grados de libertad. La siguiente versión **Souryu-II**[143] es similar pero sus módulos se separan fácilmente para poderlo transportar mejor y añadir módulos intermedios especiales.

La generación de robots **Genbu** (I, II y III)[69] está formada por cadenas cuyos módulos tiene dos ruedas independientes activas y están unidos mediante articulaciones pasivas. La aplicación para la que se ha desarrollado es apagar incendios. Los motores son hidráulicos y por el eje central del robot se puede colocar una manguera para bombear el agua y llegar a lugares donde los bomberos no pueden.

Otro robot es **Kogha**: [62] desarrollado para operaciones de búsqueda y rescate. Tiene 8 módulos conectados en serie con dos orugas, excepto los primeros y últimos. La conexión entre dos módulos dispone de 2 grados de libertad activos que le permiten trepar por los obstáculos y 3 grados de libertad pasivos que le permite adaptarse al terreno.

Algunos de los prototipos se muestran en la figura 2.6. En [50] se puede encontrar una revisión más detalladas de algunos de los robots desarrollados en el Instituto de Tecnología de Tokyo.

2.4.1.1. Centro nacional Alemán de investigación (GMD)

En el GMD han desarrollado dos prototipos de robot ápodos autopropulsados. Uno es el **GMD-SNAKE**[71] (prototipos 1 y 2). Está constituido por 12 ruedas motrices en cada módulos. Tiene 6 módulos mas uno en la cabeza. La aplicación principal para la que fue diseñado es la inspección de tuberías, aunque en [107] se estudia su uso en aplicaciones de inspección de edificios.

El otro es el robot **Makro**[113] para la inspección de alcantarillas entre 30 y 60cm de diámetro. Está formado por 6 módulos y las uniones entre ellos tiene 3 grados de libertad. Cada módulo dispone de dos ruedas para propulsarse. En la cabeza se sitúan dos cámaras así como sensores de infrarrojos para la detección de obstáculos. Aunque el robot es teleoperado, se ha propuesto una arquitectura software para convertirlo en autónomo[138].

2.4.1.2. Laboratorio de robótica móvil de la Universidad de Michigan: OmniTread

Uno de los robots ápodos autopropulsados más es **OmniTread**⁸ desarrollado por Granosik et al.[43] en el laboratorio de robótica móvil de la Universidad de Michigan, para aplicaciones de inspección industrial y vigilancia. Es un robot es muy robusto y flexible. Utiliza articulaciones neumáticas lo que le da mucha fuerza. La versión inicial, omitread **OT-8** está formado por 5 módulos hexaédricos. En las 4 caras exteriores de los módulos se han colocado dos orugas. El inconveniente es que el compresor de aire está situado fuera del robot, por lo que es necesario que haya un cable.

En la siguiente versión, **OT-4** [4] el robot se ha minituarizado y se han incorporado microcompresores eléctricos por lo que no necesita cable. Su autonomía es de unos 75 minutos. (Figura 2.7)

⁸Más información en la web: http://www.engin.umich.edu/research/mrl/00MoRob_6.html

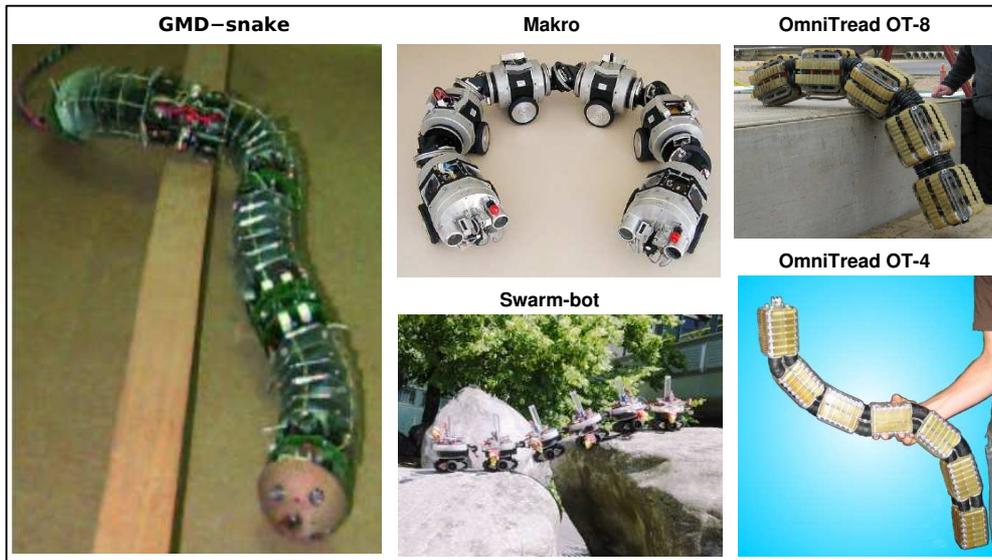


Figura 2.7: Diferentes prototipos de robots ápodos con propulsión: GMD-snake, Makro, Swarm-bot, OmniTread OT-8 y OT-4

2.4.1.3. Laboratorio de sistemas inteligentes del EPFL: Swarm-bot

El robot **Swarm-bot**⁹ se está empleando en el Laboratorio de sistemas inteligentes del EPFL para el estudio de la “inteligencia colmena”: colonias que son capaces de auto-organizarse. El prototipo desarrollado[97] está formado por pequeños robots móviles que tienen la capacidad de auto-ensamblarse para formar estructuras mayores y así realizar otras tareas. Por ejemplo, si tienen que cruzar por una grieta, se pueden organizar en una cadena.[96][44]

Cada uno de los módulos se llama **s-bot** y son totalmente autónomos. Para desplazarse utilizan orugas y están dotados de sensores.(Figura 2.7)

2.4.1.4. Grupo de robótica de la Universidad de Beihang (BUAA): JL-I

El grupo de robótica de la Universidad de Beihang comenzó con el diseño de este tipo de robots en el 99, con el diseño de un prototipo de dos módulos[150]. Cada uno con dos orugas y una articulación de 2 grados de libertad. Dotado de una cámara CCD y sensores. Además, las articulaciones son extensibles, permitiendo que se pueda aumentar o disminuir la longitud del robot.

Basado en este prototipo inicial, Houxiang et al. Diseñaron el robot **JL-I** [178]. Actualmente está formado por 3 módulos idénticos. Las articulaciones son de 3 grados de libertad lo que le dota de una gran capacidad de movimiento. No sólo puede cruzar obstáculos sino también subir escaleras

⁹Más Información <http://www.swarm-bots.org/>

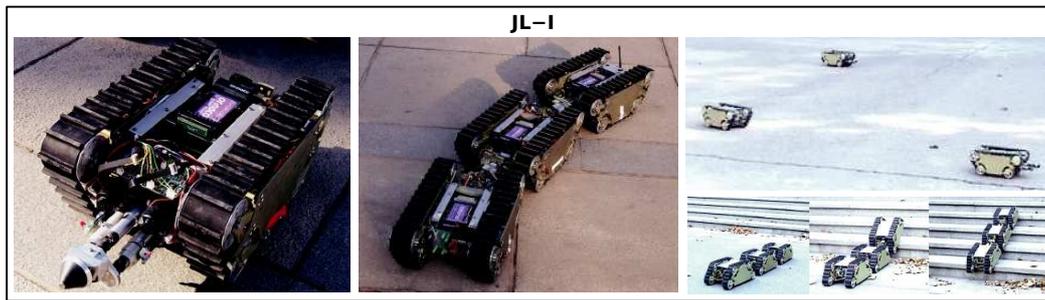


Figura 2.8: El robot JL-I

o recuperarse ante vuelcos entre otras características[177]. El robot está pensado para aplicaciones militares[181].

2.5. Robots modulares y locomoción

2.5.1. Un nuevo enfoque al problema de la locomoción

En todas las disciplinas aparece un investigador que revoluciona ese área de conocimiento, proponiendo nuevas ideas y aportando luz. Tal es el caso de **Mark Yim**, al que se puede considerar el padre de la **robótica modular reconfigurable**. Sus trabajos han inspirado a cientos de investigadores (¡Algunos de sus artículos han sido citados más de 250 veces!).

Mar Yim propuso en su tesis doctoral en 1995 un nuevo enfoque al problema de la locomoción[160]. La solución tradicional, descrita en el apartado 2.2.3, se basa en analizar las características del terreno y a partir de ellas diseñar un robot específico. Lo que propuso Yim fue utilizar robots formados a partir de módulos con la capacidad para ensamblarse unos con respecto a otros. De esta forma, estos nuevos robots modulares podrían cambiar su forma adoptando diferentes configuraciones y modos de caminar en función del terreno por el que se desplazasen en cada momento.

Para ilustrarlo, propuso un escenario real. Se preguntó, cómo tendría que ser un robot para poder llegar desde el laboratorio de robótica de Stanford hasta el edificio situado al otro lado de la calle. El robot tenía que ser capaz de moverse por un terreno plano, cruzar el porche del laboratorio, pasar por debajo de la barandilla, bajar un escalón de 60 cm y desplazarse por un terreno desigual y con maleza.

Para solucionar el problema utilizando un robot modular reconfigurable, habría que determinar qué configuraciones del robot son las mejores para cada tipo de terreno. Así, el robot inicialmente utilizaría una configuración de tipo rueda para cruzar el porche (mostró que este modo de caminar es el más eficiente para terreno plano), a continuación la “rueda” se abriría y el robot se autotransformaría

en un gusano que le permitiría cruzar la barandilla por debajo y bajar el escalón. Finalmente, el robot se transformaría en una araña de cuatro patas, configuración caracterizada por su mayor estabilidad para moverse por el terreno desigual.

Por tanto, la ventaja de estos nuevos robots modulares auto-configurables es su **gran versatilidad**. Además permiten utilizar la configuración y manera de caminar más eficientes para cada tipo de terreno. Es decir, que toman lo mejor de los robots ápodos y de los robots con patas.

2.5.2. Polypod

Esta idea de los robots auto-configurables no hubiese sido tan innovadora sino hubiese sido porque Yim demostró su viabilidad y no fue hasta unos años después de la publicación de su tesis cuando la idea realmente cuajó y se produjo el *boom* de los robots modulares.

El primer robot que desarrolló, en su tesis, fue **Polypod**. Aunque lo que se proponía era el nacimiento de los robots modulares autoconfigurables, Polypod era manualmente reconfigurable, pero lo utilizó implementar distintas configuraciones y demostrar la viabilidad de sus ideas. Los módulos de Polypod era mecánicamente complejos y están dotados de dos grados de libertad. Todos los detalles técnicos están incluidos en su tesis[160]. Un resumen detallado se puede encontrar en [38].

2.5.3. Polybot

Tras finalizar su tesis doctoral, Mark Yim empezó a trabajar como investigador en el PARC (*Palo Alto Research Center*) donde desarrolló su famoso robot **Polybot**[162]¹⁰. En realidad no es un robot en el sentido tradicional, sino que bajo ese nombre se engloban varias generaciones de módulos con los que se pueden crear robots modulares.

Según Yim, las tres promesas de la robótica modular[171] son la versatilidad, la fiabilidad y el bajo coste. La **versatilidad** es debida a que estos robots puedan cambiar su forma y desplazarse por terrenos muy diversos. La **fiabilidad** radica en la capacidad de auto-reparación. Si uno de los módulos falla se elimina o se sustituye por otro. Finalmente, el **bajo coste** se consigue aplicando la economía de gran escala a la fabricación de los módulos. Si se fabrican masivamente, el precio se reducirá.

Polybot es una plataforma de experimentación centrada en la promesa de la versatilidad. Hasta el momento han creado cinco tipos diferentes de módulos, agrupados en tres generaciones: G1, G2 y G3 (ver figura 2.9). Uno de los objetivos de diseño de todos ellos es la simplicidad. Por ello, todos están dotados de un único grado de libertad.

¹⁰Información sobre Polybot disponible en <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/>

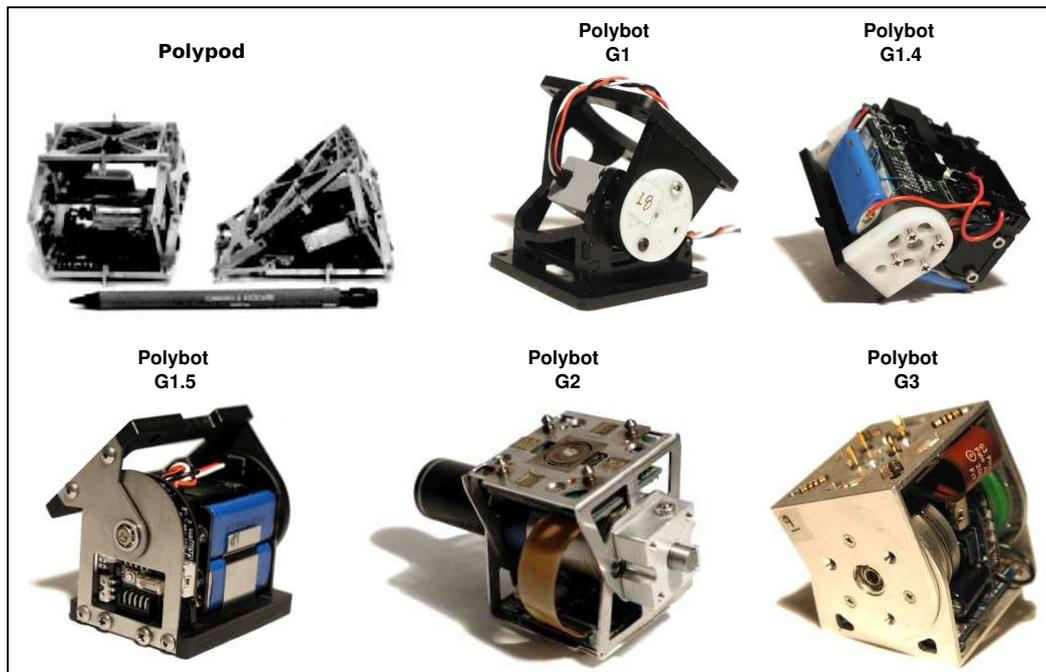


Figura 2.9: Los módulos de Polypod y Polybot

La **Generación G1** no es auto-reconfigurable, ya que los módulos no tienen la capacidad de acoplarse automáticamente unos con otros. Sin embargo se pueden realizar y probar diferentes configuraciones manuales. Han diseñado tres módulos diferentes. El primero estaba hecho de plástico y utilizaba un servo comercial como articulación. Mecánicamente es mucho más simple que los módulos desarrollados para Polypod. Se introdujo una idea muy interesante: hacer que las bases sean cuadradas para que los módulos se puedan conectar entre sí con diferentes orientaciones. Así se podrían lograr robots en los que unas articulaciones se moviesen en un plano y otras perpendicularmente a estas. Entre los experimentos realizados, destaca **el primer ejemplo de reconfiguración simple**, en la que 12 módulos adoptan inicialmente la forma de rueda. Esta se desplaza por una superficie plana hasta llegar al borde de las escalas. El robot se abre y se convierte en un gusano que puede descender por las escaleras. Fue el primer experimento en el que un robot realizaba una reconfiguración [174]. Además se experimentó con la locomoción de diferentes configuraciones: araña de 4 patas y configuración de gusano: movimiento a través de un tubo y giros (Figura 2.10).

Probada la viabilidad de los módulos, en la versión **G1v4** se introdujeron sensores para realizar aplicaciones en bucle cerrado. Realizaron experimentos de gusanos trepadores. Bien para subir por paredes y vayas (en configuración lineal) así como subir escaleras (en configuración de rueda) [165][164]. Uno de los experimentos más curioso fue el de imitar el tren inferior de un humano (caderas y piernas) y situarlo encima de un triciclo para desplazarse pedaleando [171]. Es otro ejemplo de la versatilidad de la robótica modular: se pueden crear configuraciones que permiten manipular objetos creados para

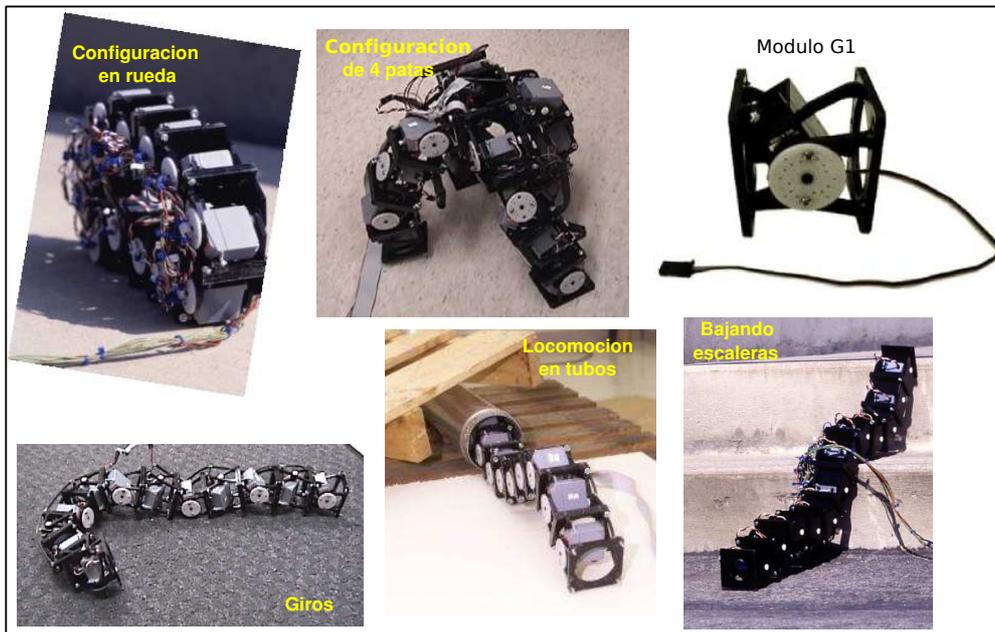


Figura 2.10: Polybot. Diferentes configuraciones de Polybot G1 (Fuente: Web del PARC)

los humanos¹¹.

Las generaciones G2 y G3 tienen la capacidad de poder acoplarse y separarse[172], lo que permite construir con ellos auténticos robots auto-configurables. La **generación G3** es un rediseño de la G2 para conseguir un módulo más compacto. Tiene unas dimensiones que le permiten caber en un cubo de 5 cm de lado. La innovación se produjo en la versión anterior. Con los **módulos G2** se realizó el primer experimento con éxito de reconfiguración dinámica[173]. En la primera parte del experimento se prueba la reconfiguración simple, en la que Polybot adopta la configuración de rueda con 12 módulos. A continuación pasa a una configuración lineal. En la segunda parte se realiza la conversión de gusano a araña de cuatro patas. Ambos extremos se pliegan hacia el interior, paralelamente al suelo adoptando el robot la forma de ∞ y acoplándose a ambos lados del módulo central. Los módulos situados en las partes exteriores se separan por lo que el robot forma una X. Ahora el robot ya posee cuatro patas con tres módulos cada una. Finalmente el robot se levanta. La gran aportación lograda con estos módulos es su capacidad de acoplarse automáticamente usando emisores de infrarrojos como guías[114].

Los **módulos G1v5** son los últimos desarrollados. No son reconfigurables sin embargo están diseñados a partir de las lecciones aprendidas con todos los módulos anteriores. Son muy robustos y están preparados para su comercialización. Para su manejo y programación han desarrollado el entorno Polykinectis[37], que incluyen un entorno de programación y un lenguaje de *scripts* para el control de las diferentes configuraciones, basado en XML[?]. Este entorno fue probado en un taller impartido

¹¹(Nota fuera de tema). Esta es una de las razones que argumentaba Isaac Asimov en sus novelas de ciencia ficción por la que los robots humanoides eran el futuro de la robótica. Todas las herramientas que habían sido diseñadas para los humanos las podrían emplear los robots y así no habría que rediseñarlas.

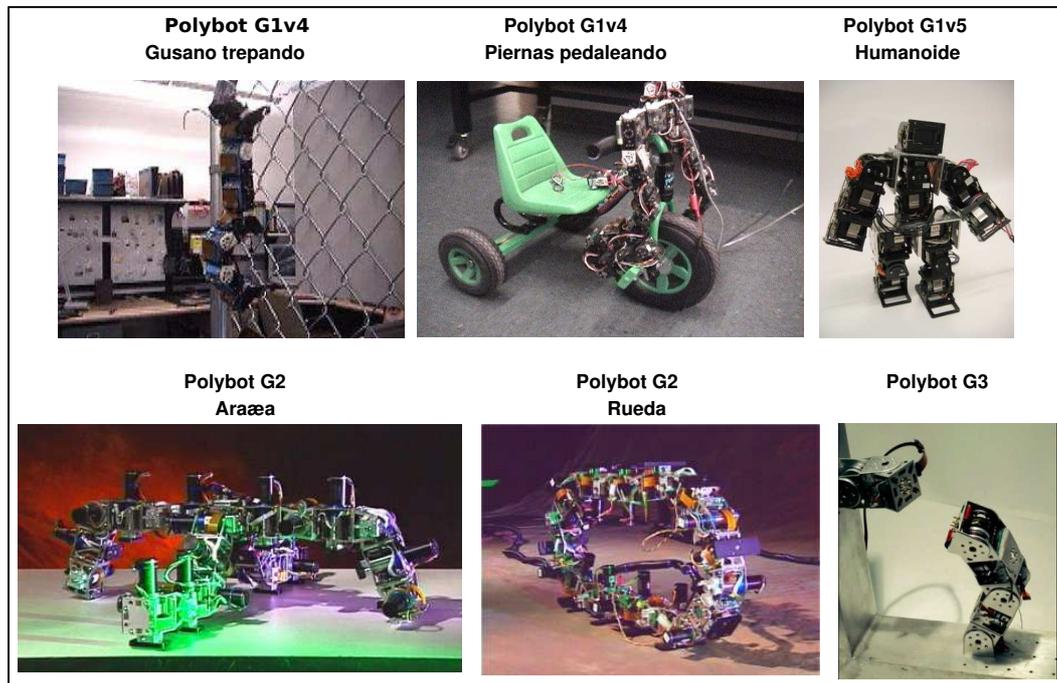


Figura 2.11: Diferentes configuraciones de Polybot

en el congreso internacional de Robots inteligentes y sistemas en el 2003 (IROS)¹². La experiencia resultó un éxito y quedaron demostradas las posibilidades de la robótica modular en el mundo de la educación.

El modelo teórico para la programación de los robots modulares que han propuesto lo denominan autómatas de fases ([179][180]). Se basa en la idea de que los movimientos principales son periódicos. Esta periodicidad se ve rota cuando ocurren ciertos eventos provenientes de los sensores. La otra idea es la de que las señales que controlan todos los módulos son las mismas pero con un desfase temporal.

En la figura 2.11 se muestran diferentes configuraciones de las generaciones G1v4, G1v5, G2 y G3 de Polybot

2.5.4. Ckbot

En 2006, Mark Yim se fue a la Universidad de Pensilvania donde ha fundado el **ModLab**¹³ (*Modular Robotic Lab*) donde se realizan investigaciones en el campo de la robótica modular.

Allí han desarrollado el robot modular **CKBOT**[109] (*Connector Kinetic roBot*) para usarlo como plataforma para sus investigaciones. Los módulos de Ckbot están inspirados en la versión G1V5 de

¹²El tutorial está disponible en este enlace: <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/parc/doc/tutorial/index.html>

¹³La página web es: <http://modlab.seas.upenn.edu/index.html>

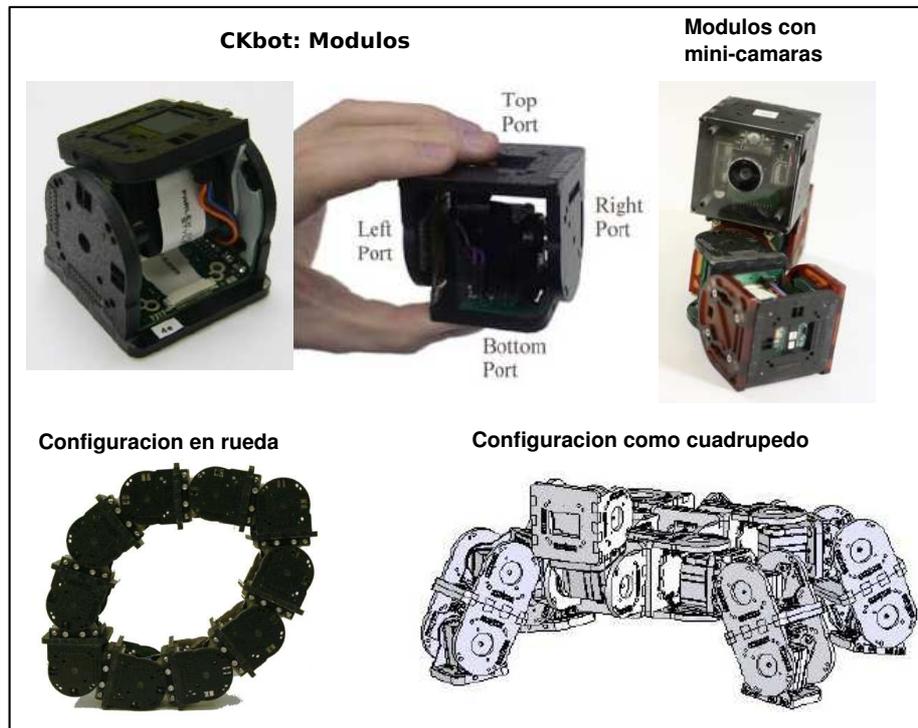


Figura 2.12: Módulos y distintas configuraciones de CkBot

Polybot: no son dinámicamente reconfigurables, pero permite crear diferentes tipos de configuraciones para explorar sus capacidades locomotivas. En la figura 2.12 se muestran los módulos y algunas de las configuraciones probadas.

Aunque el Modlab es un grupo joven, sus contribuciones están siendo muy innovadoras. Una de ellas es una nueva aplicación que Yim ha bautizado como **auto-ensamblaje tras una explosión** (SAE: *Self-reassembly After Explosion*) [169][170]. Lo que se pretende es empezar a explorar la segunda de las promesas de la robótica modular: **la robustez** y **auto-reparación**. El problema a resolver es el siguiente: Se parte de un prototipo de robot modular con una configuración determinada. En un momento dado sufre un impacto y todos sus módulos o partes del robot se dispersan por el entorno. El robot debe ser capaz de volverse a auto-montar y continuar con la tarea que estuviese realizando.

Para probar la viabilidad del sistema, han creado una configuración en forma de robot humanoide, constituida por 3 grupos de módulos (los denominan *clusters*). Cada grupo está formado por 3 módulos Ckbot y un módulo con una mini-cámara[131]. La unión mecánica entre los 3 *clusters* se hace mediante imanes permanentes, mientras que los módulos en el interior están unidos mediante tornillos. En el experimento realizado en [170], la configuración humanoide está andando. Uno de los investigadores le da una patada y los tres *clusters* se dispersan por el suelo. Mediante las minicámaras las distintas partes son capaces de reconocerse entre ellas y moverse hasta conseguir volver a reconstruir el humanoide y inicial y continuar su tarea.

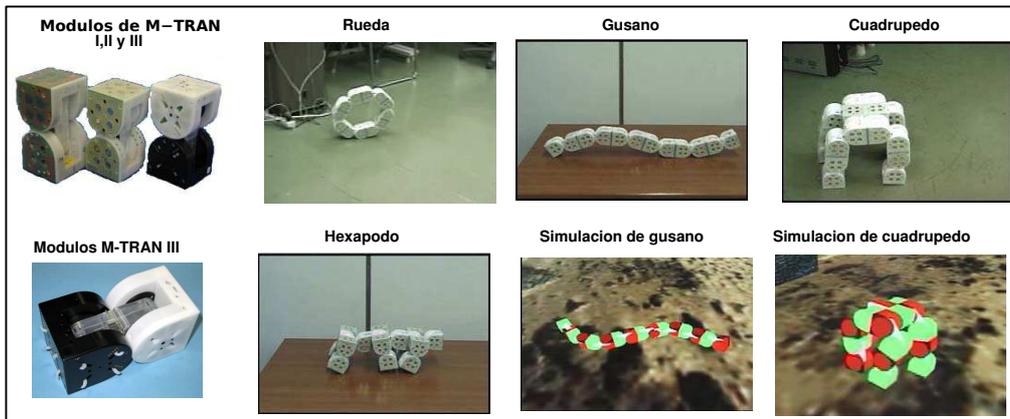


Figura 2.13: Módulos y diferentes configuraciones del robot M-TRAN

Además están continuando con el estudio y análisis de los diferentes modos de caminar de las configuraciones, como por ejemplo el movimiento de tipo rueda [123] o la creación de ciempiés robóticos a partir de módulos a los que se añaden patas externas [124].

2.5.5. M-TRAN

Uno de los robots modulares más avanzados que existen actualmente es el **M-TRAN** (*Modular TRANformer*) [101]¹⁴ desarrollado en el Instituto Nacional de Ciencias y Tecnologías Industriales avanzadas de Japón (AIST). En la figura 2.13 se muestran los módulos y diferentes configuraciones del robot.

La versión actual ha sido el resultado de más de 10 años de investigaciones. Se trata de un robot modular híbrido (ver apartado 2.7) que puede configurarse tanto para formar topologías de cadenas o retículos. Se han desarrollado tres generaciones de módulos: M-TRAN I, II y III.

El proyecto comenzó en 1998, con **M-TRAN I** [106]. Frente a la búsqueda de la simplicidad en Polybot y Ckbot, el módulo de M-TRAN tiene dos grados de libertad y un sistema novedoso de acoplaje entre módulos basado en imanes permanentes y muelles SMA (*Shape Memory Alloy*) para la separación. Están basados en los principios de unidades magnéticas internamente balanceadas del profesor Hirose [51]. Los módulos se unen unos con otros mediante imanes permanentes. La novedad del sistema radica en los muelles SMA que se activan mediante corriente para que los módulos se desacoplen. En los primeros experimentos comprobaron que los imanes permanentes tenían la suficiente fuerza como para que un módulo levantara a otro. También se exploró la viabilidad en la locomoción de diferentes configuraciones: rueda, gusano, cuadrúpedo, así como la reconfiguración dinámica [67]. Además del diseño mecánico y electrónico del módulo, desarrollaron un potente sistema de simulación [78] que utilizaron para explorar las posibilidades de los módulos, haciendo que un bloque de 12

¹⁴Información disponible en este enlace: <http://unit.aist.go.jp/is/dsysd/mtran3/>

módulos pasase por encima de un obstáculo y simularon diferentes algoritmos de planificación de movimiento[176] y simulaciones de auto-reparaciones [105].

En el 2002 desarrollaron la segunda generación: **M-TRAN-II**[104]. La idea del módulo es la misma, pero se realizaron mejoras en mecánica y *hardware*. El módulo se redujo de tamaño en un 10 % aproximadamente, se mejoró el consumo, con lo que consiguieron mayor autonomía, y el *hardware* permite comunicación *wireless*. Las innovaciones que se introdujeron fueron en el campo de la generación automática de los modos de caminar utilizando CPGs y algoritmos genéticos[63]. El algoritmo genético se ejecuta en un PC y luego se descargan los patrones de movimientos en los módulos, bien en el robot real o bien en la simulación. Se puede encontrar más información en [65]. Sin embargo, uno de los experimentos más novedosos que hicieron fue la reconfiguración de un cuadrúpedo en un gusano[76], algo que todavía no se había visto nunca. Para lograrlo es necesario planificar los pasos que deben seguir los módulos para conseguir el objetivo [175]. A raíz de estos experimentos, el M-TRAN pasó a ser el robot modular más avanzado.

La generación actual, **M-TRAN III**[64] incorpora un nuevo mecanismo de conexión mecánica, que sustituye a los imanes permanentes. Con ello han conseguido mayor eficiencia energética y mayor velocidad en la conexión/desconexión a costa de ser un mecanismo más complejo. Sin embargo, estos módulos ya no son prototipos sino que se pueden construir industrialmente. La electrónica incorporada es mucho más potente. Ahora cada módulo tiene cuatro microprocesadores conectados por un *bus CAN (Controller Area Network)*. Uno es el maestro y los otros esclavos. Se han verificado y ampliado los experimentos anteriores de locomoción[79] y reconfiguración[77]. Una de las nuevas posibilidades de estos módulos es la de incorporar módulos especializados, como por ejemplo la incorporación de mini-cámaras[125] para ayudar en la ejecución de la reconfiguración.

2.5.6. CONRO

Los módulos **CONRO**¹⁵ fueron desarrollados por Castano et al.[8] en el ISI (*Information Science Institute*) de la Universidad de California Sur para la realización de lo que denominan sistemas metamórficos: robots que pueden cambiar su forma. Lo que Yim denominó reconfigurables (término que ha prevalecido). Estos módulos tiene dos grados de libertad y la capacidad de auto-acoplarse unos a otros. En los experimentos iniciales hicieron una serpiente y un hexápodo[7]. Probaron el sistema de acoplamiento, aunque en la primera versión todavía no estaba integrado en los módulos.

Para representar la configuración de un robot reconfigurable utilizan grafos y consiguen determinar si dos robots tienen la misma configuración.[9]. También es posible colocar módulos especiales, como por ejemplo una minicámara [6].

En estudios posteriores propusieron un nuevo sistema bioinspirado para que los módulos descubran los cambios en la topología y puedan colaborar con otros módulos para realizar la locomoción y

¹⁵Más información en la web: <http://www.isi.edu/robots/conro/>

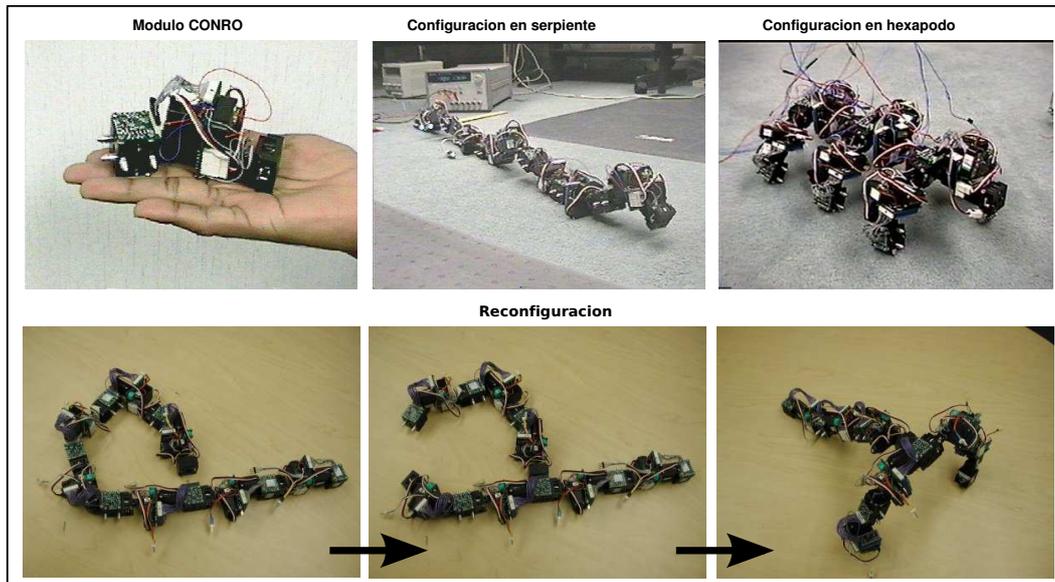


Figura 2.14: Módulo Conro y diferentes configuraciones

la auto-configuración. Desarrollaron dos protocolos, uno llamado comunicación adaptativa (AC) y otro Control distribuido adaptativo (ADC) basado en la idea de hormonas.[129]. En [116] estudian e implementan un sistema de autónomo de acoplamiento entre módulos.

En la figura 2.14 se muestra el aspecto del módulo CONRO así como diferentes configuraciones y uno de los experimentos de reconfiguración llevados a cabo.

2.5.7. SuperBot

SuperBot¹⁶ es un robot modular creado en el laboratorio de robótica polimórfica del ISI (Information Science Institute) en la Universidad de California sur. El módulo diseñado es de los más modernos (2005) y está inspirado en todos los anteriores: Conro, Polybot, MTRAN y ATRON. Es un proyecto financiado por la NASA y el DARPA. Inicialmente se desarrolló para su uso en aplicaciones espaciales[127]. Se está estudiando para emplearlo en aplicaciones como plataforma móvil para desplazarse por la superficie de otro planeta y recolectar información[145]. Entre 8 y 10 módulos se reconfiguran para formar la plataforma necesaria: como rueda (para una locomoción eficiente), araña, serpientes, torres de comunicaciones, etc. Otra aplicación es lo que sus autores denominan MULE (*Multi-Use Lunar Explorer*)[82]. La idea es colocar más de 100 módulos en el chasis de un vehículo lunar y utilizarlos para realizar diferentes tareas geológicas, con o sin la ayuda de los astronautas. El peso es muy importante en las misiones espaciales. En vez de llevar diferentes aparatos para hacer las mediciones, los módulos se pueden reconfigurar en diferentes estructuras según las necesidades.

¹⁶Más información en la página web:<http://www.isi.edu/robots/superbot.htm>

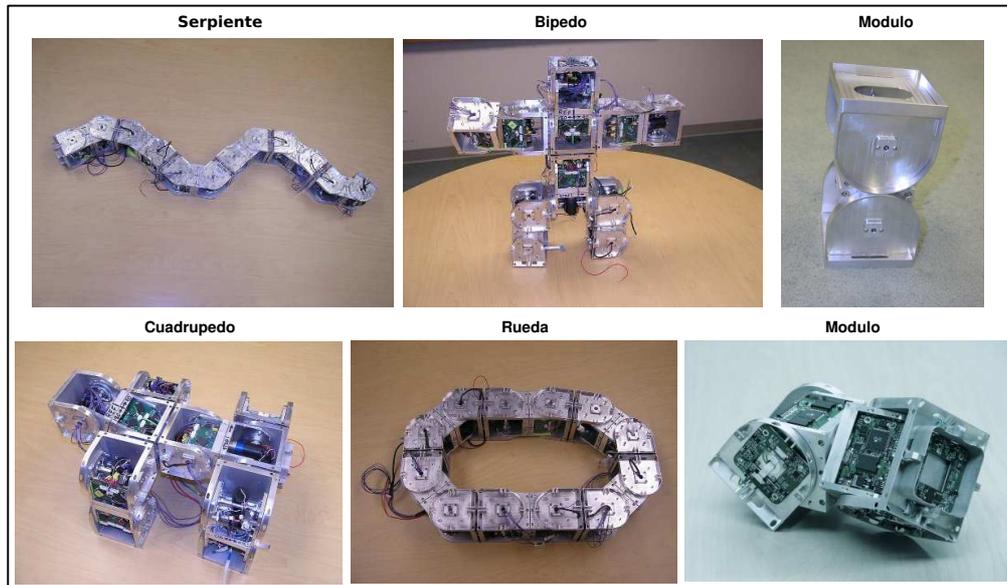


Figura 2.15: El módulo de Superbot y diferentes configuraciones

La última aplicación es la denominada HOMS (*Habitat Operations and Maintenance System*)[80] en la que se utilizan aproximadamente 150 módulos para obtener diferentes herramientas: paneles solares, limpieza y mantenimiento de las instalaciones, monitorización e inspección en tiempo real...

La mecánica de los módulos de Superbot está inspirada en MTRAN, pero incluyen un grado más de libertad. Los dos extremos giran verticalmente (*pitch*) y entre ellos rotan (*Roll*). Disponen, al igual que MTRAN de un total de 6 superficies de contacto donde se pueden acoplar otros módulos, lo que permite formar no sólo robots de tipo cadena (ver apartado 2.7) sino también estructuras sólidas en 3D[128][120].

Los sistemas reconfigurables deben solucionar varios retos: 1) negociación distribuida, de manera que los módulos se pongan de acuerdo en la tarea global a realizar, 2) colaboración distribuida, que permita traducir la tarea global en tareas locales que cada módulo pueda realizar y 3) Sincronización, para que las tareas locales se puedan realizar de manera sincronizada con el resto. Estos problemas ya fueron abordados y probados con los módulos CONRO pero suponiendo que la topología permanece invariable durante el proceso de realización de una tarea. En [122] proponen un algoritmo para poder solucionar estos problemas y que la topología pueda cambiar. Está inspirado en el concepto de hormonas[121].

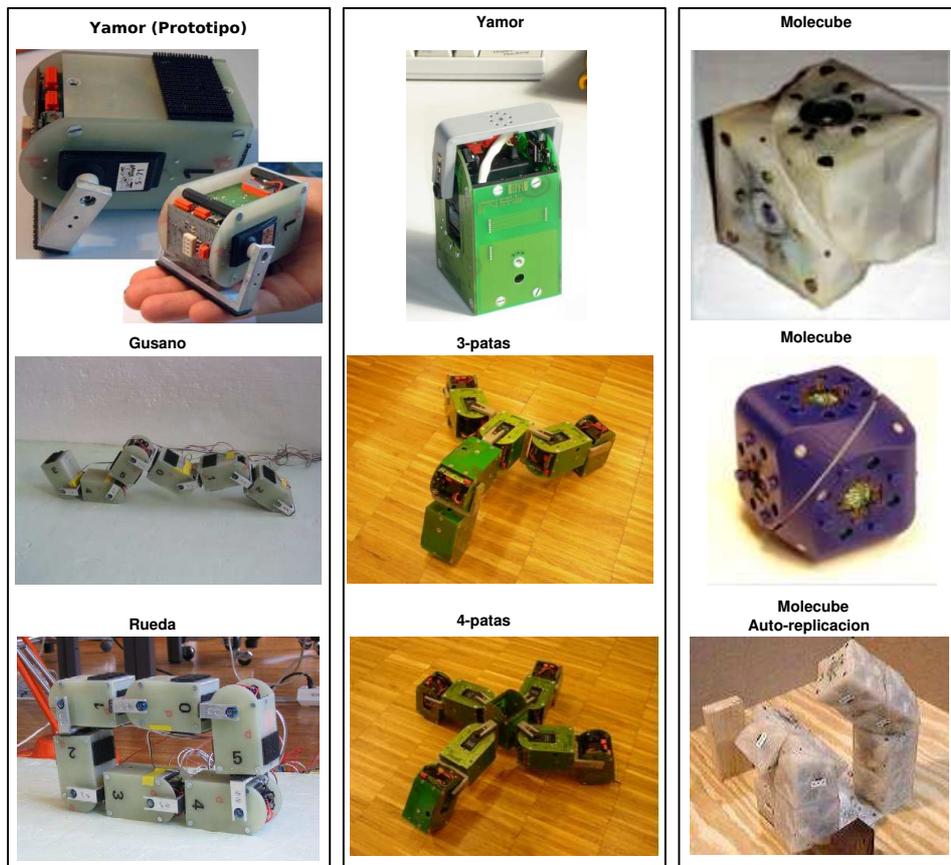


Figura 2.16: Los robots modulares Yamor y Molecube

2.5.8. Yamor

Yamor¹⁷ (*Yet Another Modular Robot*) es el robot modular desarrollado en el laboratorio de robótica bioinspirada del EPFL para estudiar la locomoción adaptativa[95]. El módulo desarrollado tiene un único grado de libertad actuado por un servo y la comunicación entre módulos y módulos-PC se realiza a través de *Bluetooth* lo que permite que no existan cables. El *hardware* de control incluye FPGAs (*Field Programmable Logic Arrays*) lo que dota al sistema de mayor versatilidad para la implementación de controladores específicos. El *software* desarrollado permite generar las funciones de movimiento utilizando una GUI (*Graphical User Interface*), que luego se descargan en el *hardware*[94].

Maye et al.[92] aplicaron los modelos de CPGs a la locomoción de los robots modulares, realizando experimentos con Yamor, validando así las simulaciones previas. Probaron el movimiento en configuración de gusano, trípodo y cuadrúpedo.

Yerly et al.[159] están trabajando en la siguiente generación de módulos, añadiendo acelerómetros y mejorando el software.

En la figura 2.16 se muestran las dos versiones realizadas de Yamor y las diferentes configuraciones probadas. En la parte central está la siguiente versión de módulos y las configuraciones de trípodo y cuadrúpedo.

2.5.9. Molecube

En el CSL (*Computational Synthesis Laboratory*) de la *Cornell University* se han desarrollado los módulos que denominan **Molecubes**¹⁸[182]. Tienen un único grado de libertad y forma de cubo. Se diferencian del resto en que la rotación se realiza alrededor del eje diagonal que une dos puntos opuestos del cubo. Al realizar una rotación de 90 grados alrededor de este eje se obtiene otro cubo.

Estos módulos no están adaptados para resolver el problema de la locomoción, aunque sí se pueden crear robots con capacidad locomotiva. Su propósito original fue el de construir **el primer sistema modular capaz de auto-replicarse a sí mismo**[183]. En el experimento que realizaron, una torre compuesta de 4 molecubes que se duplica a sí misma. Para ello se utilizan otros cuatro módulos a modo de materia prima para la replicación. El individuo inicial utiliza sus propios módulos que los va depositando en el lugar donde crear su réplica. Utilizando esta “materia prima” suministrada, se va auto-replicando. El proceso finaliza al cabo de 2 minutos y medio. Lo importante es que esta nueva copia puede a su vez duplicarse. El nuevo individuo puede crear a su vez a otro, demostrando así que se ha conseguido la auto-replicación total (tanto en comportamiento como en estructura).

¹⁷Más información en <http://birg.epfl.ch/page53469.html/>

¹⁸Más información en el enlace: <http://www.molecubes.org/>

2.6. Robots modulares y estructuras

Otra de las áreas de investigación de los robots modulares es **la capacidad para formar estructuras** y que éstas **se puedan reconfigurar**. En la figura 2.17 se muestran varios de estos prototipos. Los orígenes se remontan a 1988 con la propuesta de Fukuda et al. del Instituto de tecnología de Tokyo de su robot **CEBOT**[32] (*CELLular ROboT*). Cada Cebot se considera como una célula autónoma que puede moverse y juntarse a otras. También desarrollaron la idea de los sistemas robóticos dinámicamente reconfigurables[31]. Es una idea similar a la de la robótica reconfigurable pero está aplicada a las estructuras, en vez de a la locomoción. El sistema se puede reorganizar para realizar tareas mayores. Cada célula dispone de su propio conocimiento (lo que denominan células de conocimiento) y puede utilizar el conocimiento de otros. Se trata de un sistema inteligente distribuido.

Chirikjian et al., del PKL (*Protein Kinematics Lab.*) de la Universidad Johns Hopkins propusieron los **manipuladores metamórficos**[13]. Se trata de una red de módulos dispuestos en dos dimensiones que tienen la capacidad de acoplarse y desacoplarse unos con otros por lo que pueden desplazarse a través de la estructura global. A diferencia de CEBOT, los módulos no pueden desplazarse por sí solos, pero sí pueden moverse al conectarse entre módulos adyacentes. Estudiaron la cinemática de estos manipuladores[12] y propusieron su uso para capturar satélites en el espacio. Inicialmente el manipulador tiene una forma no definida, como una ameba. Mediante el desplazamiento de unos módulos sobre otros aparecen unos tentáculos que envuelven el objeto a coger. Pamecha et al. hizo una implementación de dos módulos, Al robot lo llamaron **Metamorphic**[108]. Cada módulo tiene una forma hexagonal que se puede deformar por medio de 3 actuadores.

Este concepto de manipuladores metamórficos fue perfeccionada por Murata et al., del AIST, en prototipo **Fracta**[102]. Las “células” son mucho más sencillas y no tienen ningún actuador por lo que el consumo es menor. Para realizar los desplazamientos y los acoples/desacoples utilizan imanes permanentes y electroimanes. Al igual que Metamorphic, las estructuras que se construyen son en dos dimensiones.

La idea la ampliaron a la construcción de estructuras en tres dimensiones, diseñando el robot **3D-Fracta**[103] con estructura cúbica y seis brazos que unen el centro con cada una de las caras del cubo. Se utilizan en total 6 actuadores. Estas investigaciones junto a las ideas de la robótica modular de Mark Yim fueron las semillas del robot modular híbrido M-TRAN, que no sólo puede desplazarse sino también conformar estructuras en tres dimensiones.

Hamblin et al. crearon a **Tetrobot**[46], constituido por un módulo tetraédrico con articulaciones esféricas. El sistema es manualmente reconfigurable. En los experimentos realizaron brazos y robots caminantes.

En el Instituto para los sistemas de ingeniería complejos del CMU, Unsal et al. desarrollaron el robot **I-CUBE**: [55] constituido por dos elementos: *cubes*(pasivos) y segmentos activos. Los segmentos



Figura 2.17: Diferentes robots modulares de tipo retículo

tiene 3 grados de libertad y se usan como brazos que se enganchan a los *cubes*. Se pueden construir diferentes estructuras en 3D que tiene la capacidad de modificarse¹⁹.

En el PARC, Suh et al. desarrollaron el robot **Telecubes**[140]²⁰. Es un cubo que tiene 6 articulaciones prismáticas que le permiten desplazar todas sus caras. Además en todas las caras se ha implementado un sistema de acoplamiento/desacoplamiento por lo que se pueden conectar y desconectar unos módulos de otros. Con este sistema se pueden crear estructuras 3D muy compactas y que se pueden reconfigurar.

En el laboratorio de robótica distribuida del MIT²¹ también están interesados en los robots modulares. Kotay et al. han creado a **Molecule**[74]. Este robot imita a una molécula de dos átomos, unidos por un segmento rígido. Cada átomo tiene 5 conectores para la conexión con otras moléculas y dos grados de libertad. La agrupación de varias moléculas permite crear estructuras tanto en dos dimensiones como en 3. En el primer prototipo sólo implementaron una molécula. En siguientes trabajos mejoraron los módulos e implementaron una estructura de dos moléculas[72][73].

En el mismo laboratorio, Rus et al. trabajan en **Crystal** [118], un robot reconfigurable constituido por átomos que pueden formar estructuras en 2D. Los átomos son cubos en tiene 4 caras que se pueden expandir. A diferencia de otros robots modulares donde hay traslación de los átomos, en este el movimiento se consigue sólo con las expansiones y compresiones[119].

El último prototipo desarrollado en el MIT es **Miche** [34]. La idea es totalmente diferente al resto de robots modulares. Se parte de una estructura amorfa, como si fuere una roca de mármol en el mundo de la escultura. El usuario especifica la forma en 3D que quiere “esculpir”. Se realizan los cálculos y el sistema desconecta de la masa amorfa todos aquellos módulos no necesarios. Cuando se coge el objeto, quedan en el suelo los módulos no usados y permanece la estructura creada. Los módulos son cubos que sólo tienen la capacidad de acoplarse unos con otros (no tiene grados de libertad). Entre los experimentos realizados han “esculpido” un perro y un humanoide.

En el instituto para la producción de tecnología de Dinamarca están trabajando en **ATRON**[61]. A partir de las ideas de CONRO y M-TRAN han creado un módulo esférico que puede girar alrededor de su ecuador, dividiendo el módulo en dos semiesferas que rotan una respecto a la otra. Los módulos se pueden acoplar entre ellos de forma que la rotación se haga en cualquiera de los tres ejes: x, y y z. En la última versión han creado 100 de estos módulos y han realizado diversas simulaciones y experimentos[17]

Goldstein et al, del CMU, están desarrollando la idea de sintetizar estructuras reales en tres dimensiones a partir de modelos virtuales, dentro del proyecto **Claytronics**[35]²². El objetivo es el desarrollo de lo que denominan un Claytronics: un objeto sintético generado por ordenador, pero con una estructura física real. Estos sistemas están formados por unos átomos que denominan **Catoms** (Claytronics

¹⁹Más información en <http://www.cs.cmu.edu/~unsal/research/ices/cubes/>

²⁰Más información: <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/lattice/telecube/index.html>

²¹Más información en el enlace: http://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/index.php/Main_Page

²²Más información en <http://www.cs.cmu.edu/~claytronics/hardware/planar.html>

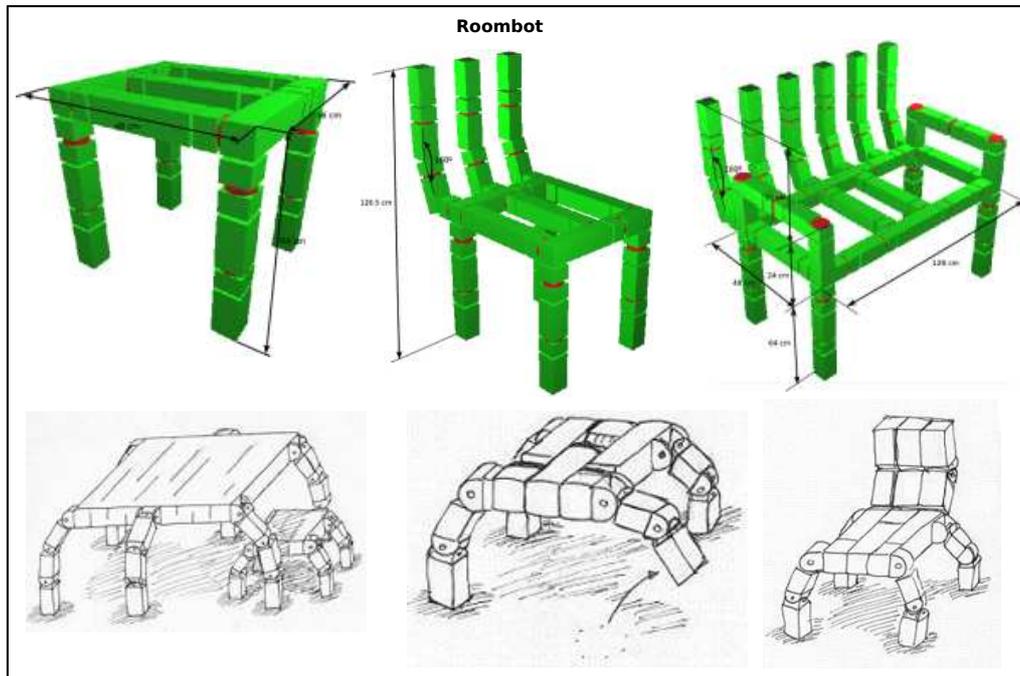


Figura 2.18: Prototipo de Roombot: un robot modular de tipo retículo diseñado para hacer muebles reconfigurables :-)

Atoms) que se pueden desplazar en 3D por toda la estructura. La recombinación de estos átomos hace que el Claytronics tenga la forma deseada. En el prototipo Miche también se sintetizan estructuras reales, pero el enfoque es el de un “escultor” que elimina el material sobrante. En el enfoque de los Claytronics son sus propios átomos los que se reorganizan para crear el objeto.

En la primera fase están trabajando en los Catoms restringidos a dos dimensiones [70]. El movimiento de estos catoms se realiza mediante la correcta coordinación de electroimanes, de manera que no es necesario ningún tipo de actuador. El objetivo es que se pueda miniaturizar para lograr tener nano robots de este tipo y que se puedan recolocar para formar los Claytronics.

En los laboratorio de robótica bioinspirada (BIRG) y algoritmos de aprendizaje (LASA) del EPFL han propuesto un innovador concepto. Utilizar estas estructuras 3D para la creación de muebles que se puedan reconfigurar. El prototipo de módulo propuesto es **RoomBot**[2]²³ y está inspirado en Yamor. En la figura 2.18 se muestran la forma que presentarían algunos muebles, constituidos por estos módulos. Quieren que estos muebles formen parte del nuevo centro que se está construyendo :-). Estos muebles no sólo serán estáticos, sino que tienen la capacidad de desplazarse²⁴

²³Más información: <http://birg.epfl.ch/page65721.html>

²⁴(Nota del autor). No tengo muy clara cuál es la utilidad de estos muebles móviles, sin embargo me parece una aplicación divertida y “frikí” :-). Estoy deseando hacerles una visita para ver el sistema en acción.

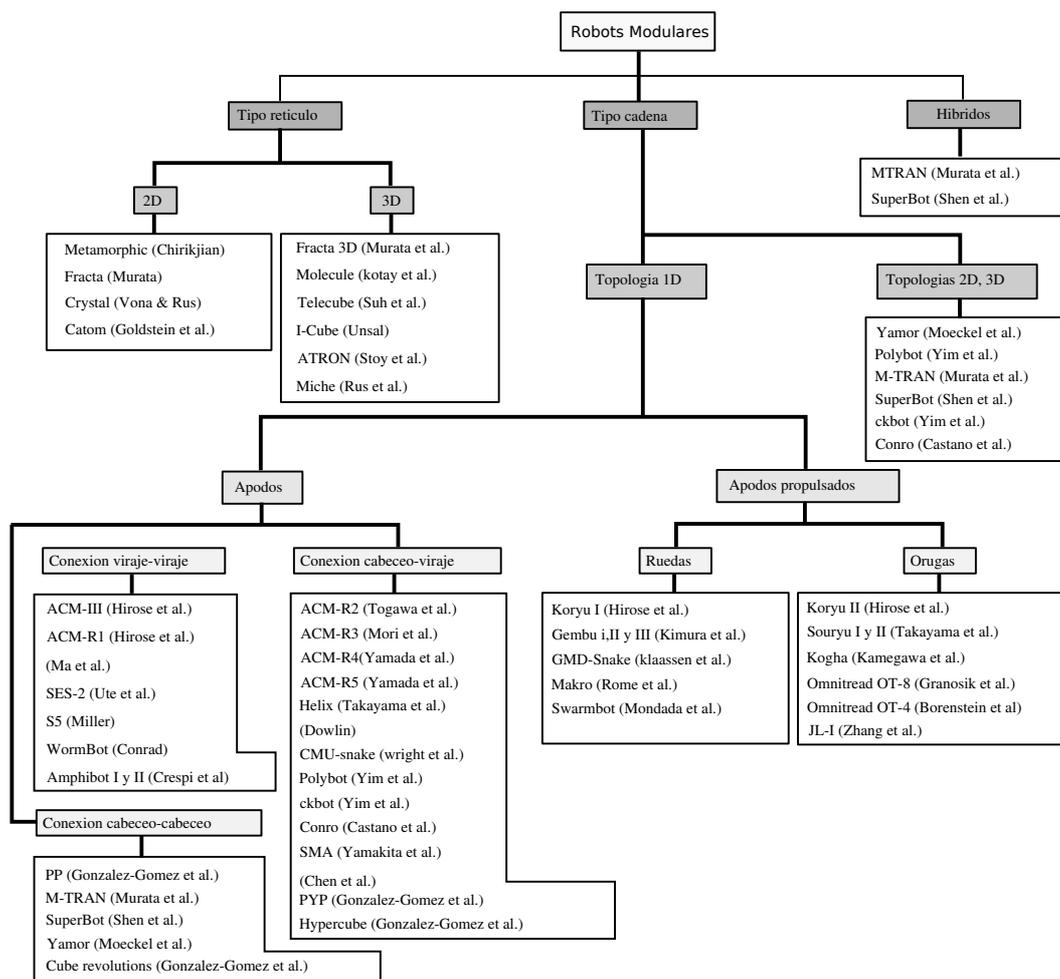


Figura 2.19: Clasificación de los robots modulares

2.7. Clasificación de los robots modulares

En la figura 2.19 se muestra una clasificación de los robots modulares en función de su estructura y conexionado, que se explica a continuación. Todos los robots previamente presentados se agrupan en diferentes clases.

Para el estudio de las propiedades de locomoción de las configuraciones de los robots modulares es esencial establecer una clasificación en grupos que compartan las mismas propiedades. La clasificación propuesta está basada en la estructura y el conexionado entre los módulos. Hay que resaltar que los robots modulares reconfigurables pueden pertenecer a diferentes grupos, dado que se pueden construir diferentes configuraciones con ellos. Así por ejemplo, con los módulos de Polybot se puede crear un robot ápodo con conexión cabeceo-cabeceo, que está englobado en los robots con topología de 1D. Pero también se podrá construir un cuadrúpedo, con una topología de 2D.

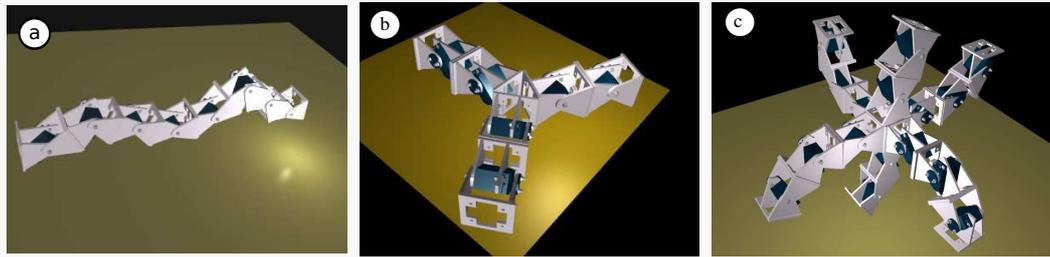


Figura 2.20: Ejemplo de los tres subtipos de robots modulares de tipo cadena: a) Topología 1D, b) Topología 2D, c) Topología 3D

Mark Yim[167] propone hacer una primera división en tres grupos: retículo (*lattice*), cadenas e híbridos. Los robots modulares de **tipo retículo** se conectan para formar estructuras, de igual manera que los átomos se junta para formar moléculas complejas o sólidos. Son los robots que se han descrito en el apartado 2.6. La idea detrás de todos ellos es la de hacer estructuras que puedan auto-modificarse dinámicamente. Según el tipo de estructura, se pueden agrupar en 2D y 3D. Entre los primeros se encuentran **Metamorphic**[13], **Fracta**[102], **Crystal**[119] y **Catom**[70]. Entre los segundos, **Fracta 3D**[103], **Molecule**[74], **Telecube**[140], **I-Cube**[148], **ATRON**[61] y **Miche**[34].

Los robots modulares de tipo cadena están formados por la unión de diferentes cadenas de módulos. Por ejemplo, la estructura de un robot cuadrúpedo se puede ver como constituida por cinco cadenas: una central que actúa de columna vertebral y cuatro más para las extremidades. Los robots de este grupo son los mejores para la locomoción, dado que permite reconstruir la morfología de los animales. Las cadenas de módulos pueden actuar como patas, brazos, columna vertebral, etc. Los robots de tipo retículo, aunque también pueden realizar locomoción, es mucho más lenta, ya que está basada no en el desplazamiento global de la estructura sino en el movimiento módulo a módulo. Los **robots modulares híbridos** tienen las propiedades de los dos grupos anteriores: permiten construir superficies con ellos así como realizar estructuras de tipo cadena. Dentro de este grupo se encuentran los dos robots modulares más avanzados, **M-TRAN**[104] y **SuperBot**[127].

Los robots de **tipo cadena** se pueden dividir, a su vez, atendiendo a su topología. Así se pueden tener topologías de 1D, como gusanos y serpientes, topologías 2D, como cuadrúpedos, estructuras poligonales como estrellas, pentágonos, etc. o topologías 3D como erizos. En la figura 2.20 se muestra un ejemplo de diferentes topologías. Una vez más, hay que resaltar que los robots reconfigurables pueden tener configuraciones con diferentes topologías por eso se pueden agrupar en varios grupos. El criterio seguido en el diagrama ha sido el de colocar los robots según los experimentos que se hayan realizado con ellos, así por ejemplo, con Polybot se han realizado experimentos en su configuración de cuadrúpedo, por lo que se ha incluido en el grupo de topologías de 2D pero también se ha probado su configuración como gusano, por lo que está en su grupo correspondiente de las topologías de 1D.

Las **topologías de 1D** pueden ser gusanos, serpientes, brazos, piernas, columnas vertebrales, etc. Estas estructuras, en general, son muy flexibles y pueden adoptar diferentes formas. Por ejemplo, pueden

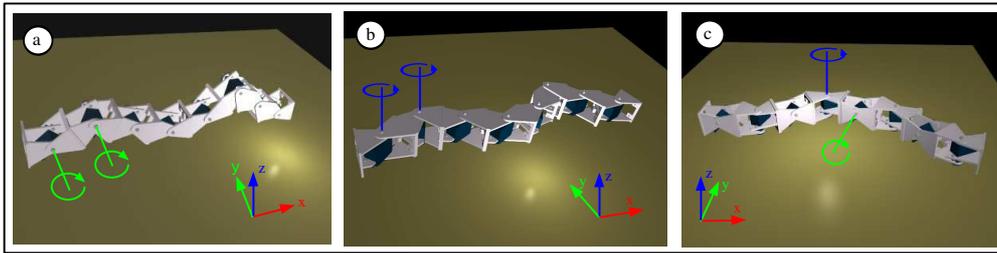


Figura 2.21: Diferentes tipos de conexiones en los robots ápodos. a) Cabeceo-Cabeceo. b) viraje-viraje. c) Cabeceo-viraje

introducirse por tubos, por intestinos o en general rutas tortuosas. Si su longitud es suficientemente larga, pueden incluso formar bucles y desplazarse como una rueda[66][139].

Según cómo se genere la propulsión para lograr el movimiento en estos robots proponemos dividirlos en dos categorías. En una están los que denominamos **robots ápodos**²⁵, que consiguen desplazarse a base de movimientos corporales. Los módulos por sí solos son incapaces de moverse, pero cuando se juntan formando una cadena y se coordinan adecuadamente sí logran hacerlo. Sería el caso de las serpientes y gusanos biológicos. En el otro grupo están los que obtienen el impulso a partir de ruedas u orugas. Los denominamos **robots ápodos autopulsados**. En ellos, los módulos sí pueden desplazarse como unidades autónomas, ya que disponen de estos sistemas propulsivos. Este grupo se emplea para aplicaciones de búsqueda y rescate o inspección de tuberías o puentes. Suelen ser robots más industriales. Al disponer de movilidad por ruedas u orugas pueden desplazarse por terrenos muy diversos. Por ser topologías de 1D, tienen la flexibilidad de este grupo por lo que pueden adoptar su forma al terreno, escalar obstáculos, pasar por tubos, etc. Entre los **robots ápodos propulsados por ruedas** se encuentran: **Koryu I**[53], **Gembu**[69], **GMD-Snake**[71], **Makro**[113] y **Swarmbot**[97]. Entre los **robots ápodos propulsados por orugas**: **Koryu II**[54], **Souryu I**[141], **Souryu II**[143], **Kogha**[62], **Omnitread OT-8**[43], **Omnitread OT-4**[4], **JL-I**[178].

En el grupo de los **robots ápodos**, proponemos clasificarlos según el tipo de conexión entre los módulos. Como se muestra en la figura 2.21, este conexión puede ser de tipo viraje-viraje (es decir, los módulos rotan paralelamente al suelo), cabeceo-cabeceo (lo hacen perpendicularmente) y cabeceo-viraje donde se alternan los módulos que rotan paralelos al suelo y los que lo hace perpendicularmente.

El conexión entre los módulos es una propiedad muy importante y determina qué tipos de movimientos se van a poder realizar. Así, el **grupo viraje-viraje** es el que comprende a todos los robots que se mueven como las serpientes. Este tipo de movimiento exige que el coeficiente de rozamiento en la tangente al eje corporal sea muy pequeño mientras que el normal sea infinito (o lo mayor posible). Las serpientes consiguen esto gracias a su piel escamosa. En los robots serpientes se usan ruedas pasivas para cumplir este requisitos. Por ello, este grupo de robots es especial. No sólo requiere de

²⁵Aclaración terminológica: Granosik et al. propusieron llamar a ambos grupos snake robots y serpentine robots. Los primeros son los que he bautizado como robots ápodos y los segundos como robots ápodos propulsados.

unos movimientos corporales, sino también de las ruedas pasivas o pieles. Son por tanto, robots específicos. Si se toman unos módulos genéricos (por ejemplo los de Polybot) y se construye un robot de este grupo, no se conseguirá su locomoción sin añadir elementos externos).

Dentro de este grupo se encuentran todos los robots desarrollados basados en el movimiento de las serpientes en un plano. Son: **ACM-III**[48], **ACM-R1**[49], **(Ma et. al)**[85], **SES-2**[149], **S5**[93], **Worm-Bot**[19] y **Amphibot I** y **II**[21].

El **grupo cabeceo-cabeceo** sólo permite a los robots moverse en una dimensión, hacia adelante y hacia atrás. Es un movimiento similar al de las orugas o gusanos. También se pueden plegar sobre sí mismos para formar una rueda. En esta tesis este grupo de robots se utilizar para el estudio detallado de la locomoción en una dimensión. Robots en los que se han realizado experimentos en esta tipo de conexionado son **M-TRAN**[104], **Polybot**[162], **Superbot**[127], **Yamor**[95], **PP**[40] y **Cube Revolutions**[39]. Estos dos últimos creados en esta tesis.

El **grupo cabecero-ladeo** permite al robot realizar muchos tipos de movimientos diferentes, como rodar, desplazamiento lateral (*side-winding*), trepar, etc. Algunos de los robots ya presentados que tienen este tipo de conexionado son: **ACM-R2**[146], **ACM-R3**[99], **ACM-R4**[157], **ACM-R5**[156], **Helix**[142], **(Downlin)**[27] **CMU-snake**[155], **Polybot**[162], **Ckbot**[170], **Conro**[8], **SMA**[158], **(Chen et al.)**[11], **PYP**[40] e **Hypercube**[42]. Estos dos últimos creados por el autor de esta tesis.

2.8. Coordinación y locomoción

Hemos presentado el estado del arte de los robots ápodos y modulares, y los hemos clasificado según su estructura y su conexionado. En esta sección analizaremos su control. Veremos qué alternativas existen para resolver el problema de la coordinación y cuál es la que hemos empleado en esta tesis.

2.8.1. El problema de la coordinación

Cuando un robot móvil dispone de ruedas u orugas, el nivel inferior de la locomoción no presenta problemas. Sólo hay que hacer que los motores giren para conseguir el movimiento. Las dificultades aparecen en las tareas del nivel superior, como la planificación de trayectorias y la navegación.

Sin embargo, si el robot es articulado y bien dispone de patas o se trata de un robot ápodo, aún si la locomoción se realiza sobre una superficie plana sin obstáculo aparece **el problema de la coordinación**. Es necesario que todas las articulaciones se muevan en sincronía para que el robot logre desplazarse. Este problema se puede enunciar de la siguiente manera:

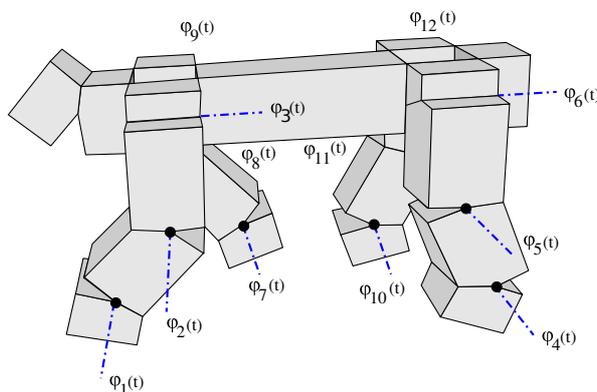


Figura 2.22: Ejemplo del problema de la coordinación en robot cuadrúpedo de 12 articulaciones. Encontrar las funciones $\varphi_i(t)$ para que el robot se pueda desplazar

Problema de la coordinación: Dado un robot de M articulaciones encontrar las funciones $\varphi_i(t)$ que determinan cómo tienen que variar con el tiempo el ángulo de cada articulación para que el robot logre desplazarse.

En la figura 2.22 se muestra un ejemplo de un robot cuadrúpedo modular, con topología de dos dimensiones y doce articulaciones. El problema de la coordinación quedará resuelto si se encuentran las funciones $\varphi_1(t), \dots, \varphi_{12}(t)$ y el valor de sus parámetros para los cuales el cuadrúpedo es capaz de desplazarse. La solución depende del tipo de movimiento que se quiera conseguir: desplazamiento en línea recta, lateralmente, giros, etc, y en general no será única.

En los siguientes apartados se muestran las diferentes formas de abordar este problema

2.8.2. Enfoque I: Solución manual

Para implementar fácilmente la locomoción en robots modulares, Mark Yim utilizó en Polygod lo que denominó **tablas de control del modo de caminar** (*gait control tables*)[160]. Las columnas son vectores que contienen las posiciones discretas de una articulación para cada instante. En las filas se almacenan las posiciones de todas ellas para un instante t . El controlador recorre las tablas, enviando en cada instante las posiciones a los actuadores. Cuando se llega a la última fila se comienza desde el principio, realizándose un movimiento repetitivo.

Cuando los robots modulares tienen pocos módulos y los movimientos son sencillos, estas tablas se pueden crear manualmente. Permiten definir las secuencias de movimiento “fotograma a fotograma”, como si de una animación se tratase. Esta es la solución adoptada en el robot **Puchobot I**, de Prieto-Moreno[110]. Utilizando un *software* con una interfaz gráfica que se ejecuta en el PC, el usuario establece las posiciones de las articulaciones, que se graban en la tabla de control.

Otro ejemplo es el robot hexápodo **Melanie III** de Alonso-Puig[1]. La aplicación que se ejecuta en el PC permite la generación manual de las secuencias. El posicionamiento de las articulaciones se puede hacer bien mediante la propia interfaz gráfica (usando barras deslizantes) o bien utilizando programación gestual, de manera que el usuario coloca las patas del robot en las posiciones deseadas y la aplicación las graba.

Las soluciones manuales permiten probar los prototipos de los robots durante su construcción y detectar en una temprana fase de diseño los posibles problemas mecánicos. También permite explorar muy rápidamente posibles soluciones para la coordinación. Sin embargo, son muy poco flexibles. Para hacer que el robot se mueva de diferentes maneras hay que crear una nueva tabla de control. Además, si el robot tiene muchas articulaciones, la creación puede ser tediosa y compleja.

2.8.3. Enfoque II: Cinemática inversa

El enfoque clásico se basa en el empleo de la cinemática inversa. La idea es aplicar las mismas técnicas usadas para los manipuladores pero a las patas de los robots. Las funciones $\varphi_i(t)$ se obtienen a partir de las funciones de trayectoria de los puntos de apoyo. Este método ha sido estudiado a fondo en hexápodos por Fligiolini[30] y ha sido implementado en el robot Melanie de Alonso-Puig[1]. Se especifican las trayectorias de los extremos de las patas mediante funciones sinusoidales. Por medio de la cinemática inversa se obtienen las posiciones de los ángulos $\varphi_i(t)$.

Los robots ápodos se pueden considerar como manipuladores hiperredundantes, formados por infinitas articulaciones. Chirikjian[14] utiliza funciones para describir la forma que debe adoptar el manipulador y obtiene las expresiones angulares. Gonzalez et al.[41] han explorado también este tipo de soluciones, pero usando lo que denominan el algoritmo de ajuste, en el que se itera sobre las articulaciones y se van encontrando los ángulos para que todas ellas se sitúen sobre una curva. Con estos algoritmos han creado automáticamente las tablas de control y han movido exitosamente un robot ápodo de 8 articulaciones. Spranklin[135], en su tesis doctoral, estudia la cinemática y dinámica un robot ápodo del grupo cabeceo-cabeceo y propone una solución utilizando controladores clásicos.

El inconveniente del enfoque clásico basado en la cinemática inversa es que requiere mayor potencia de cálculo comparado con los enfoques bioinspirados que se muestran a continuación. Y por tanto, los controladores bioinspirados en general necesitan microprocesadores menos potentes (y baratos) para su implementación.

2.8.4. Enfoque III: Bioinspiración

Otro enfoque diferente es utilizar la naturaleza como fuente de inspiración e intentar imitarla. Los seres vivos del reino animal simplemente se desplazan. Sus cerebros no parece que estén leyendo en



Figura 2.23: La Lamprea, utilizada por los biólogos para el estudio de sus CPGs

todo momento las posiciones (x, y, z) de las extremidades y realizando cálculos de cinemática inversa para establecer la contracción de todos los músculos en cada instante.

En la naturaleza, tanto los vertebrados como los invertebrados tienen unas neuronas especializadas, denominadas CPGs (*Central Pattern Generator*, o generadores centrales de patrones). Estos centros oscilan y producen ritmos que controlan la actividad de los músculos para la realización de actividades como la respiración, movimientos intestinales, masticar, locomoción, etc. A partir de los estudios biológicos se construyen modelos matemáticos de estos osciladores y se aplican para el control de la locomoción de los robots. En este enfoque bioinspirado las funciones $\varphi_i(t)$ a aplicar se obtienen de los modelos matemáticos de los CPGs. A diferencia del enfoque basado en la cinemática inversa, durante el movimiento el controlador bioinspirado no conoce las posiciones de sus extremidades. Simplemente actúa sobre los músculos para lograr la locomoción. Por ello, la potencia de cálculo necesaria es en principio menor que para el enfoque II.

2.8.4.1. CPGs y biología

Una de las áreas de investigación de la biología es la fisiología donde, entre otras cosas, se estudian los mecanismos en la realización de las funciones básicas de los seres vivos, como por ejemplo caminar. La existencia de generadores de patrones fue documentada por primera vez por Wilson[153] en el estudio del vuelo de la langosta. En el experimento realizado por Shik et al.[130] en 1966 en gatos descerebrados, se observó que el mecanismo de la locomoción en vertebrados está situado en la espina dorsal, y estaba basado también en los generadores de patrones. Los estímulos provenientes del cerebro no se encargan de la generación de este movimiento sino más bien de su “modulación”. Delcomyn[25], en 1980, acuñó el término CPG para referirse a este grupo de neuronas que oscilan de manera rítmica.

Dentro del grupo de los vertebrados, **la lamprea** (ver figura 2.23) es el que más se utiliza para el estudio de los CPGs, debido a que su espina dorsal es transparente, contiene pocas células y aguanta al menos una semana fuera del animal (en una solución salina) sin deteriorarse. Esto permite a los biólogos realizar sus experimentos con más facilidad[115].

Cohen propuso **un modelo matemático para el CPG de la lamprea**[18] y más tarde Williams et al. realizaron diferentes experimentos sobre la diferencias de fase observadas[151], generación de los patrones[152] y el efecto de la frecuencia de oscilación en la coordinación[132].

2.8.4.2. CPGs y robótica

La fusión de diferentes campos de investigación siempre arroja luz y permite abordar los problemas desde otras perspectivas. Eso ha ocurrido con la robótica y la biología. Uno de los pioneros en aplicar modelos de CPGs para su aplicación en robótica a sido Ijspeert, del laboratorio de robótica bioinspirada del EPFL. En su tesis doctoral[56] propuso modelos neuronales para la implementación de CPGs para la locomoción de la lamprea y la salamandra, sentando las bases para su posterior implementación en un robot real. Mediante algoritmos evolutivos se obtienen los parámetros para una locomoción óptima. En trabajos posteriores continuó realizando simulaciones de sus modelos[60] y en el 2004, junto con Crespi, implementaron el primer prototipo de **amphibot**[21] (ver apartado 2.3.4), demostrando la viabilidad de su modelo bioinspirado para la locomoción de robots.

En trabajos posteriores mejoraron el modelo e investigaron la transición de un modo de caminar de la salamandra a otro. Este animal se caracteriza porque puede nadar y se puede desplazar por tierra. Ambos movimientos han sido modelados, simulados e implementados en amphibot[58]. En [57] estudiaron el problema de cómo conseguir que esta transición sea suave.

Los modelos de CPGs no sólo han demostrado su validez para diseños de robots específicos como amphibot, sino que también se están empelando con éxito en la locomoción de robots modulares genéricos. El EPFL es puntero en estos temas. Bourkin realizó simulaciones de la locomoción de un robot modular con diferentes morfologías: como rueda, como gusano y como cuadrúpedo. Todos ellos utilizando CPGs[5]. Posteriores mejoras en la simulación fueron realizadas por Marbach et al.[89][90], y las validaciones en el robot Yamour fueron llevadas a cabo por Sproewitz et al. [136][137] y May[92].

En el robot modular M-tran también se han aplicado con éxito el modelo de CPGs. Kamimura et al. utilizaron el modelo de CPGs de Matsuoka[91] para implementar la locomoción de un gusano y un cuadrúpedo[65].

El modelo bioinspirado de CPGs se está empleando no sólo en robots modulares, sino para la locomoción de robots cuadrúpedos[33][133], en el robot Scorpion de 8 patas: [26] e incluso en robots humanoides [28].

En el grupo de neurocomputación de la Escuela Politécnica de la Universidad Autónoma de Madrid, Herrero et al. han modelado e implementado CPGs basados en el modelo de Rulkov[117] para el control de un robot gusano de 8 segmentos[47]. Los experimentos se realizaron posteriormente en el robot Cube Revolutions, desarrollado en esta tesis.

2.8.5. Enfoque IV: Generadores sinusoidales

El problema de la coordinación ya ha sido resuelto por la Naturaleza. Por tanto “sólo” hay que imitarla para conseguir la locomoción de los robots. Sin embargo, en los mecanismos biológicos existe cierta complejidad además de mucha redundancia. Tal vez esas soluciones estén muy especializadas o sean muy “ricas”, aportando demasiada información que pudiera no ser necesaria para la locomoción de robots.

En el campo de la neurocomputación se modelan detalladamente todas las neuronas y CPGs, se obtienen sus ecuaciones matemáticas y posteriormente se simulan. Además, es posible probar esos modelos en robots reales con el fin de confirmar si son correctos, comparando la locomoción de los animales robóticos artificiales con la de los reales. El fin de estos experimentos, por tanto, es confirmar la validez de sus modelos. El robot es sólo un medio para este fin. Sin embargo, desde una perspectiva robótica sucede lo contrario. El objetivo es tener un robot que pueda desplazarse de la mejor manera posible, con el menor consumo de potencia y de recursos. Los modelos neurocomputacionales se usan como inspiración y se aplican las simplificaciones necesarias.

Debido a esto, otro enfoque para abordar el problema de la coordinación es **emplear soluciones basadas en modelos de CPGs lo más simplificados posibles**, de manera que su implementación sea sencilla y requiera de pocos recursos. Una simplificación posible es **sustituir los CPGs por generadores sinusoidales** que controlen directamente la posición de las articulaciones del robot. Esta simplificación es viable para el estudio de la locomoción de robots en régimen permanente, ya que cuando los CPGs han alcanzado el régimen estacionario, se comportan como osciladores de frecuencia fija. Además, la observación de la locomoción animal muestra que las frecuencias de los movimientos rítmicos son iguales y no hay evidencias de que los diferentes osciladores de la espina dorsal usen frecuencias diferentes[56][90].

Uno de los objetivos de esta tesis es explorar la locomoción de los robots ápodos de conexión de tipo cabeceo-cabeceo y cabeceo-viraje empleando generadores sinusoidales. Esta idea se está utilizando recientemente para el desplazamiento de robots de topologías de una dimensión consiguiéndose unos movimientos muy reales, suaves y naturales, como por ejemplo en los últimos robots ápodos del CMU[84][155]. Chen et al. los están utilizando para obtener movimientos que sirvan para adaptarse al entorno.[10]. También se está estudiando su viabilidad en robots de topologías de dos dimensiones. Tal es el caso del cuadrúpedo **PuchoBot II**[111] en el que Prieto-Moreno et al. han utilizado generadores sinusoidales para su locomoción en línea recta.

2.9. Aplicaciones de los robots modulares

Los robots modulares tienen unas características que los hacen únicos. Entre ellas se pueden destacar: flexibilidad en la locomoción, auto-reparación, auto-replicación, auto-reconfiguración y formación de estructuras sólidas.

Aunque existen prototipos muy avanzados, todavía se están explorando sus posibilidades en usos prácticos. A continuación clasificamos las referencias ya presentadas según las tres aplicaciones principales que se están evaluando:

- **Búsqueda y rescate:** [161][93][154][50][62][178].
- **Inspección de tuberías y puentes:** [141][143][113][43][107]
- **Aplicaciones espaciales:** [166][134][127][80][82][145]

2.10. Conclusiones

En este capítulo hemos visto la evolución de los robots ápodos modulares y los últimos prototipos que se han creado en los centros de investigación internacionales más importantes. Se ha presentado **el problema de la locomoción** y cómo frente a las soluciones clásicas que utilizan estructuras rígidas con ruedas, orugas o patas ha surgido la idea de emplear **robots modulares auto-configurables**, que son capaces de cambiar su forma para desplazarse de la manera más eficiente en cada momento. También se han desarrollado robots modulares orientados a la creación de estructuras en dos y tres dimensiones, de manera similar a como los átomos y moléculas forman la materia. Esto permitirá, en un futuro, crear objetos sólidos que puedan cambiar su forma.

Desde un punto de vista de la estructura, en la última década se ha incrementado el interés por los **robots ápodos**. Tienen una topología de una dimensión que les confiere unas capacidades locomotivas únicas, como la posibilidad de deformar su cuerpo para pasar por el interior de tubos o zonas con muchos recovecos. El desplazamiento de estos robots se realiza mediante movimientos corporales, de manera similar a cómo lo hacen las serpientes y gusanos. Para su utilización en aplicaciones prácticas se han desarrollado los **robots ápodos autopulsados**, que también tienen una topología de una dimensión, pero el impulso lo consiguen mediante ruedas u orugas situadas en los diferentes módulos y no mediante movimientos corporales.

Como resumen, **se ha establecido una clasificación** de todos los robots presentados, usando como criterio las estructuras que pueden formar y las conexiones entre los módulos. Los grupo de interés en esta tesis son los de los robot ápodos con **conexiones del tipo cabeceo-cabeceo** y **cabeceo-viraje**. El grupo de robots con conexión de viraje-viraje, similares a las serpientes reales, ha sido ampliamente estudiado por otros investigadores. Estos robots precisan de unas condiciones especiales de rozamiento entre su cuerpo y la superficie por la que se desplazan por lo que en los prototipos existentes se añaden ruedas pasivas o pieles artificiales. Sin embargo, en los otros grupos la locomoción se consigue únicamente mediante movimientos corporales. Su estudio permitirá que cualquier robot modular genérico que adopte una topología en una dimensión pueda desplazarse sin tener que utilizar módulos especiales ni pieles artificiales.

El **problema de la coordinación** aparece al estudiar el nivel inferior de la locomoción de los robots modulares. Consiste en calcular las funciones y sus parámetros que se deben aplicar a cada una de las articulaciones para que el robot se pueda desplazar. Una de las soluciones a este problema que está dando muy buenos resultados es **el enfoque bioinspirado** basado en utilizar como funciones de control los **modelos matemáticos de los CPGs** de los animales.

Desde un punto de vista biológico, los CPGs se estudian para entender su funcionamiento y saber más sobre los seres vivos. Para ello se realizan mediciones sobre diferentes animales, se proponen ecuaciones matemáticas para modelar esos CPGs, se realizan simulaciones y recientemente, se implementan en animales robóticos para confirmar si son correctos. Es decir, **obtener conocimientos biológicos utilizando como instrumentos de validación los robots**. Las investigaciones se centran en la obtención de datos y modelización de los CPGs.

Sin embargo, desde una perspectiva robótica sucede lo contrario. El objetivo es tener un robot que pueda desplazarse de la mejor manera posible, con el menor consumo de potencia y de recursos. Los modelos biológicos se usan como inspiración y se aplican las simplificaciones necesarias. Los parámetros internos de los CPGs y su significado biológico no tienen tanta importancia. Por ello, otro enfoque para la locomoción de los robots es **la utilización de modelos simplificados de CPGs**. En esta tesis proponemos un modelo para la locomoción de los robots ápodos basados en **generadores sinusoidales**.

Aunque otros investigadores han construido prototipos de robots ápodos de los grupos cabeceo-cabeceo y cabeceo-viraje, su locomoción desde una perspectiva general no ha sido abordada hasta ahora. No se han resuelto los problemas de la cinemática directa e inversa ni se han relacionado su locomoción con el número de módulos del robot. Las siguientes preguntas, por tanto, no tenían respuesta: *¿Cuál es el número mínimo de módulos que debe tener un robot para desplazarse en una y dos dimensiones? ¿Cuál es el mínimo número de parámetros de control necesario para lograr la locomoción de los robots ápodos de cualquier número de módulos? ¿Cómo calcular el paso que da un robot ápodo en función de los parámetros empleados en sus generadores sinusoidales? ¿Qué amplitudes y diferencias de fase hay que aplicar a las oscilaciones de los módulos para conseguir que el robot cumpla unas restricciones dadas?*

En esta tesis se aborda el estudio de la locomoción de los robots ápodos, tanto en una como en dos dimensiones, desde esta perspectiva general. Se establecen relaciones entre los parámetros de los osciladores y la manera en la que se desplaza el robot. Se propone una metodología para resolver los problemas de la cinemática directa e inversa y se resumen todas las ideas en unos principios de locomoción. Se presentan las **configuraciones mínimas**, que son los robots con el menor número de módulos que se pueden desplazar, así como los movimientos que pueden realizar y qué valores de los parámetros de control son necesarios. Finalmente se han llevado a cabo experimentos tanto en simulación como con robots modulares reales, que confirman los principios enunciados.

Con este trabajo **se confirma la viabilidad de la utilización de los generadores sinusoidales** para el control en régimen permanente de los robots ápodos. Esto permite implementar controladores

utilizando menos recursos que con los enfoques clásicos y por tanto pueden integrarse en microprocesadores de gama baja, o directamente como componentes hardware en una FPGA.