

Principales líneas de investigación en robots tipo ápodos



Autor: Juan González Gómez

Tutor: Eduardo Boemo Scalvinoni

PRINCIPALES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN ROBOTS REPTORES TIPO ÁPODOS

Autor: Juan González Gómez

Tutor: Eduardo Boemo Scalvinoni

Septiembre/2002

Resumen

Los robots ápodos, o más conocidos como robots serpiente (snake robots), intentan imitar a estos animales, tanto en su comportamiento como en sus propiedades, para resolver diferentes problemas, como son la inspección de zonas de difícil acceso, tuberías, alcantarillas, zonas con muchos obstáculos, robots escaladores, endoscopios, etc... En este trabajo se muestran los modelos más significativos, que se están desarrollando en los principales centros de investigación, analizando las tecnologías y los problemas que se resuelven. Se muestran las principales líneas de investigación y se recopila documentación y enlaces web. Finalmente se obtienen conclusiones sobre la tecnología de este tipo de robots.

Índice

1. Introducción	7
1.1. Robots humaniformes	7
1.2. BioBots o robots bio-inspirados	7
1.3. Robots ápodos	8
1.4. Encuadre del trabajo	9
2. Principales líneas de investigación	9
2.1. Sensor Based Planning Lab (CMU)	9
2.1.1. USAR robot	10
2.1.2. Inspección de puentes	10
2.1.3. Movimiento	11
2.2. Institute for Autonomous Intelligent systems (Ais)	12
2.2.1. MAKRO	12
2.2.2. GMD snake	15
2.2.3. GMD snake2	17
2.3. Hirosoy & Yoneda Lab	17
2.3.1. ACM III	19
2.3.2. Soft Gripper	19
2.3.3. Oblique Swivel Mechanism Arm (1979)	21
2.3.4. Active Endscope (ELASTOR)	21
2.3.5. KR2	21
2.4. JPL	23
2.5. Proyecto Copernicus	24
2.6. Beckam Institute of Advanced Science and Technology	26
2.7. Robots diseñados por personas particulares	26
2.7.1. Dr. Gavin Miller	26
2.8. Slither	27
2.9. Sniky	29
2.10. PARC (Palo Alto Research Center)	29
2.11. G1 (1997)	30
2.12. G1V4	32
2.13. G2	35
2.14. G3	35
3. CONCLUSIONES	37

Índice de figuras

1.	Robot humaniforme ASIMO, realizado por HONDA	7
2.	Robot escorpión del BAR	8
3.	Robot Perro Aibo, de Sony	8
4.	Robot USAR para rescate, CMU	10
5.	Inspección de puentes	11
6.	Movimiento sinusoidal, unidimensional	12
7.	Movimiento tipo “rueda”	13
8.	Movimiento tipo concertina	14
9.	Robot serpiente modular, que implementa el movimiento “concertina”	15
10.	Robot MAKRO	15
11.	Robot MAKRO	16
12.	Serpiente del BAR (Ais)	16
13.	snake2, en el BAR	18
14.	ACM III (1972-1975)	19
15.	Robot ACM3 adaptándose a la forma de un camino muy tortuoso	20
16.	Robot ACM3 adoptando la forma de un “corazón” a la vez que se desplaza	20
17.	Soft Gripper	20
18.	El agarrador robótica levantando a un niño	21
19.	Oblique Swivel Mechanism	22
20.	OBLIX. Robot serpiente construida a base de articulaciones oblicuas	22
21.	Endoscope	22
22.	KR2	23
23.	JPL Visual inspection	24
24.	copernicus	24
25.	Movimiento de Copernicus	25
26.	Modelo de módulo de copérnicus	25
27.	R7	26
28.	Prototipos S1 y S2	26
29.	Prototipos S3 y S4	27
30.	Slither	28
31.	sniky	29
32.	Polybot montando en un triciclo	30
33.	Polybot moviendo una pelota	31
34.	Spider	31
35.	Esquema de los módulos G1	32
36.	Fotos de los módulos G1	33
37.	Módulos G1v4	34
38.	Módulos G2	35
39.	Modulos G3	36



Figura 1: Robot humaniforme ASIMO, realizado por HONDA

1. Introducción

1.1. Robots humaniformes

Actualmente existen muchos tipos de robots, tanto en entornos industriales como en universidades y centros de investigación. Y es precisamente en esto últimos dónde se están realizando prototipos de robots que, aunque no tienen inicialmente una aplicación industrial directa, permiten desarrollar y probar nuevas tecnologías en robótica.

Los robots humaniformes intentan imitar a los humanos, tanto en su forma como en su comportamiento. Todavía están muy lejos de comportarse ni siquiera como un niño de 2 años, sin embargo se han realizado muchos avances en la morfología y la sincronización de movimientos. El último prototipo se denomina **ASIMO**[1], desarrollado por Honda, cuyo aspecto es muy similar al de un astronauta (fig 1).

Estos tipos de robots tienen la ventaja de que, al ser similares a un humano, podrían manejar las mismas herramientas y objetos que los humanos, sin tener que diseñarlas específicamente. Por ejemplo, un robot “pintor” podría utilizar las mismas herramientas que un pintor humano. Otra de las motivaciones que están llevando al desarrollo de este tipo de robots es la relación con los propios humanos. Dado que son robots parecidos a nosotros, es más fácil que sean aceptados que si tuviesen formas más extrañas.

1.2. BioBots o robots bio-inspirados

Otros muchos tipos de robots están *bio-inspirados*, intentando imitar a diferentes animales e insectos. Muchos de los problemas que se quieren resolver, ya han sido resueltos por la propia

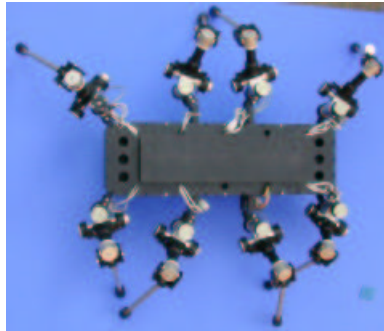


Figura 2: Robot escorpión del BAR



Figura 3: Robot Perro Aibo, de Sony

naturaleza, por lo que parte de las investigaciones se centran en copiar e imitar el comportamiento de ciertos animales e insectos. En el **Biomimetic Autonomous Robot Team (BAR)**[2] del **Ais**[3] (Institute for Autonomous Intelligent systems), en Alemania, se están construyendo diversos prototipos de *biobots*, entre los que destacan el diseño de un **robot escorpión**[5] (fig 2), totalmente autónomo y alimentado mediante paneles solares, que será soltado en el desierto Mojave. El robot escorpión deberá llegar hasta un punto situado a 25 millas, sin ningún tipo de ayuda humana.

En la figura 3 se muestra a **AIBO**[6], el *perro robot* diseñado por Sony, totalmente inspirado en un perro, pero con la finalidad de ser utilizado como mascota.

1.3. Robots ápodos

Dentro de los **robots** bio-inspirados se encuentran los **robots tipo ápodo**, que intentan imitar a aquellos animales e insectos que no disponen de ningún tipo de patas ni miembros para desplazarse, como son las serpientes y los gusanos. Estos tipos de animales presentan unas características que los hacen muy interesantes para ser imitados:

- Se pueden mover por cualquier superficie, por muy escarpada que sea

- Pueden adoptar multitud de formas, lo que les permite introducirse por huecos y agujeros
- Tienen una sección muy pequeña en relación al tamaño total del animal
- Son muy uniformes
- Pueden escalar

Los **robots ápodos** reciben diferentes nombres, según el centro de investigación. Los más extendidos son: **snake-robots** y **serpentine-robots**, aunque el nombre técnico es el de **Robots hiper-redundantes o Robots fuertemente articulados (Highly-articulated robots)**.

1.4. Encuadre del trabajo

Este trabajo se centra en los robots ápodos, mostrando los diseños más interesantes desarrollados en los principales centros de investigación, recopilándose documentación y enlaces webs.

También es interesante estudiar las diferentes aplicaciones de este tipo de robots, así como las diferentes soluciones técnicas adoptadas.

Finalmente se muestran las líneas de investigación más recientes.

2. Principales líneas de investigación

En este apartado se muestran los principales trabajos basados en robots ápodos, así como las aplicaciones a las que se destinan.

2.1. Sensor Based Planning Lab (CMU)

En el Sensor Based Planning Lab[8] de la Universidad Carnegie Mellon[7] tienen las siguientes líneas de investigación basadas en robots serpiente[9] (snake-robots):

1. Búsqueda y rescate:

Debido a la pequeña sección de estos robots así como a su gran cantidad de grados de libertad, se pueden inspeccionar zonas a las que el acceso es complicado, como en el caso de catástrofes naturales como los terremotos. Mediante un brazo multiarticulado, inspirado en una serpiente, con una mini-cámara por cabeza, un operador puede inspeccionar una zona[10].

2. Inspección tridimensional

Creación de algoritmos para el control de robots hiper-redundantes, de forma que éstos puedan desplazarse por un espacio tridimensional. Debido a la naturaleza de estos robots, son muy difíciles de controlar, por lo que es preciso utilizar algoritmos de planificación del movimiento[11]. Sobre este tema se puede consultar [12, 13, 14, 15].



Figura 4: Robot USAR para rescate, CMU

3. Movimiento

Estudio e implementación de mecanismos de movimiento para que los robots serpiente puedan desplazarse, bien en línea recta, bien en un plano 2D o bien en un espacio 3D[17].

2.1.1. USAR robot

El “Urban Search and Rescue (USAR) Robot” [10] está diseñado para aprovechar sus múltiples grados de libertad para inspeccionar zonas de difícil acceso (fig 4). Un operador controla el robot, y a través de una minicámara situada en la “cabeza” de la serpiente va observando la zona, realizando la búsqueda.

2.1.2. Inspección de puentes

Otras de las aplicaciones que se están estudiando es la de utilizar un robot serpiente para inspeccionar los puentes, comprobando el estado de las soldaduras, realizando operaciones de



Figura 5: Inspección de puentes

limpieza, pintura, etc... en zonas que no son fácilmente accesibles por los brazos robots tradicionales (fig 5)

2.1.3. Movimiento

Se están tratando dos aspectos. Por un lado el **estudio del movimiento** y por otro la **modularidad**. Por la características de que las serpientes y gusanos son muy uniformes, a la hora de construirlos se puede recurrir a pequeños módulos que se ensamblan unos con otros, construyendo robots serpiente de cualquier longitud.

Las serpientes avanzan mediante movimientos cíclicos de locomoción, llamados en inglés **gaits**¹. Los trabajos de investigación se centran en estos mecanismos de movimiento para adaptarlos a las serpientes mecánicas, de forma que se puedan mover en línea recta, por una superficie 2D o un espacio tridimensional. Para su implementación se utilizan serpientes modulares, aprovechándose para estudiar si este tipo de diseño es correcto o sería preferible por el contrario realizar diseños específicos no modulares[17].

Los *gaits* en los que se centra la investigación son [18]:

1. **Movimiento sinusoidal** (figura 6).

Una función sinusoidal se propaga desde la cabeza hasta la cola. Para que el movimiento sea estable es preciso que por lo menos haya dos periodos de la señal durante todo el tiempo, para que siempre existan al menos dos puntos de apoyo. La amplitud de la señal determina la altura máxima del obstáculo a superar, bien por arriba o por abajo, aunque este tipo de movimiento no está diseñado para superar obstáculos, sino más bien para desplazarse por una superficie plana.

¹Que se puede traducir como “andares” aunque voy a utilizar el término ingles para no crear confusiones.

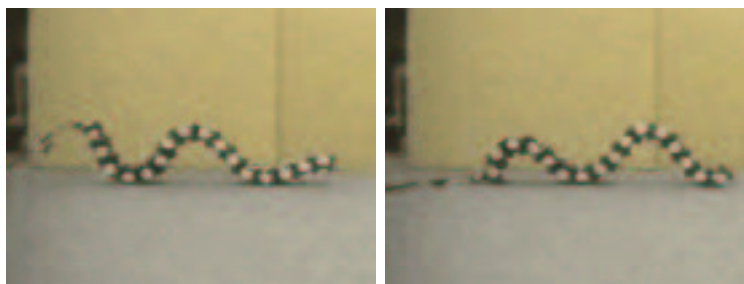


Figura 6: Movimiento sinusoidal, unidimensional

2. **Movimiento rodante (Rolling) (Figura 7)**

Se trata de un tipo de movimiento que no se encuentra en la naturaleza. La cabeza de la serpiente se une con la cola, formando un bucle y adoptando una forma muy parecida a las orugas de los tanques, que se puede desplazar hacia adelante y hacia atrás. Los servos adaptan los ángulos que le dan la forma deseada, que vienen descritos por un periodo de la onda, y al ser propagada produce el movimiento.

3. **Concertina** Las fases de este movimiento se pueden ver en la figura 8. Para que se pueda realizar se necesitan puntos de apoyo tanto en el suelo como en el techo. Las serpientes lo utilizan para desplazarse por el interior de agujeros, apoyándose en suelo y techo, o bien para escalar, apoyándose en las dos paredes verticales.

Inicialmente la serpiente se encuentra enrollada. La parte delantera (cabeza) avanza, siempre manteniendo en la parte trasera al menos dos puntos de apoyo. Esta ondulación se propaga hasta la cabeza, quedando la parte trasera estirada y la delantera enrollada. Finalmente se vuelve a enrollar.

En la figura 9 se muestra el prototipo de una serpiente que se desplaza utilizando este tipo de movimiento. La serpiente utiliza dos paredes verticales para el apoyo de las ondas transversales, paralelas al plano del suelo.

2.2. **Institute for Autonomous Intelligent systems (Ais)**

En el **Institute for Autonomous Intelligent systems (Ais)**[3], dentro del **German National Research (GMD)** [4] tienen abiertas las siguientes líneas de investigación en el campo de los robots serpiente, realizadas por el grupo BAR (**Biomimetic Autonomous Robots**):

- Inspección de alcantarillas[19]
- Movimiento por áreas de difícil acceso

2.2.1. **MAKRO**

Robot multisegmento para la inspección de alcantarillas que no son accesibles por el hombre[19]. Está constituido por módulos con ruedas que se pueden conectar entre sí y que pueden modi-



Figura 7: Movimiento tipo “rueda”



Figura 8: Movimiento tipo concertina

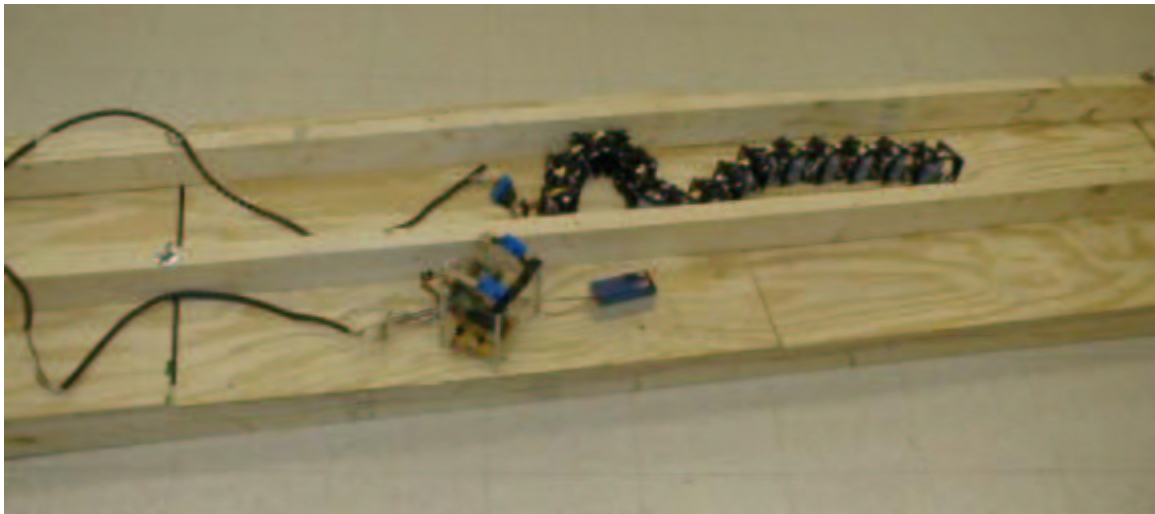


Figura 9: Robot serpiente modular, que implementa el movimiento “concertina”

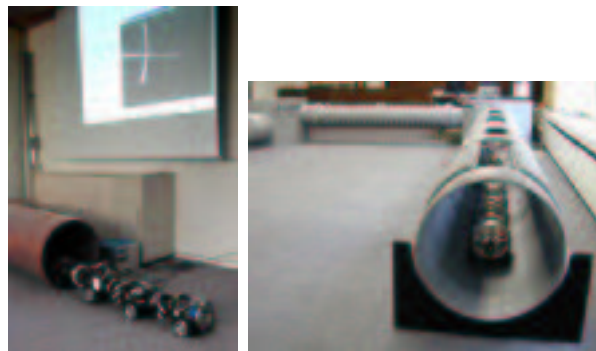


Figura 10: Robot MAKRO

ficar su ángulo de contacto, de manera que el robot puede girar, subir y bajar. Está diseñado para trabajar en tuberías con un diámetro entre 300-600mm. En las figuras 10 y 11 puede ver a MAKRO.

Este robot está siendo utilizado por la empresa **Inspection System** [20], dejando de ser un robot puramente de investigación.

2.2.2. GMD snake

Para el estudio de serpientes que sean capaces de alcanzar zonas de difícil acceso, han desarrollado el prototipo mostrado en la figura 12

El objetivo del proyecto es imitar el movimiento de una serpiente lo mejor posible, que pueda desplazarse por superficies escabrosas, superar obstáculos, adoptar diferentes formas, etc... Los resultados obtenidos se quieren aplicar a la inspección de tuberías.

La serpiente está constituida por 15 secciones idénticas que forman el cuerpo y un elemento especial que forma la cabeza. Se utilizan sensores ópticos para la orientación.

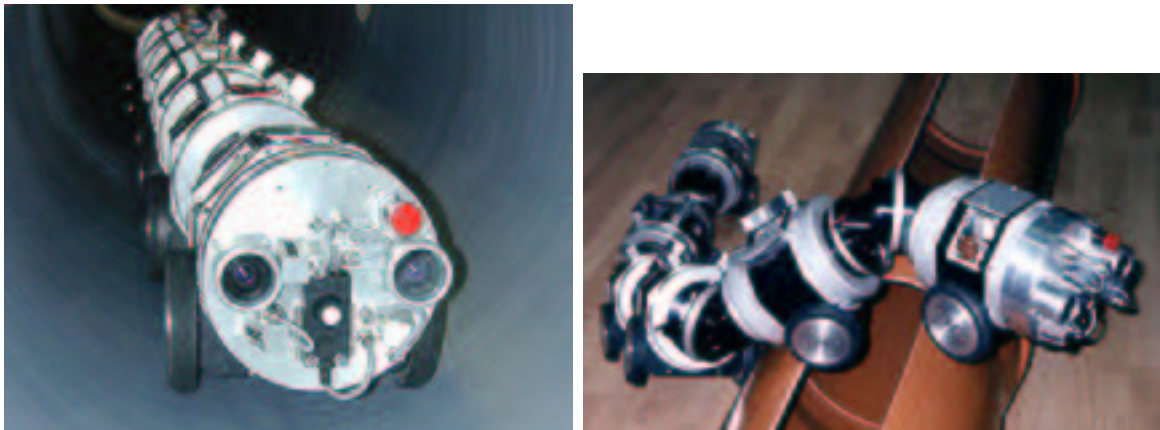


Figura 11: Robot MAKRO



Figura 12: Serpiente del BAR (Ais)

Cada sección está dotada de su propio procesador (esclavo) que controla el movimiento de las articulaciones y obtiene el estado de sus sensores de posición. Todos los esclavos están unidos por un bus serie, **CAN-BUS**[22, 23] y conectados a un procesador central que coordina los movimientos. La alimentación se sitúa fuera de la serpiente, necesitándose un cable externo.

Las características del robot con 6 secciones son:

- **Longitud** 200cm
- **Peso:** 3Kg
- **Diámetro:** 6cm
- **Consumo medio:** 15W
- **Velocidad de avance:** 50cm/min

2.2.3. GMD snake2

Segundo prototipo (Figura 13), basado en la experiencia del primero. Puede tener como máximo 15 secciones, cada una con tres motores (2 para implementar una articulación universal y 1 para ruedas motoras). También disponen de 6 sensores de infrarrojos para medir distancias, 3 sensores para medir el par y 3 sensores para medir la inclinación y la posición con respecto a la siguiente sección. En la cabeza se sitúa una video cámara que envía las imágenes a un monitor. La cabeza también dispone de sensores de ultrasonido para detectar obstáculos y en la cola se puede colocar un módulo con baterías, lo que permite que la serpiente tenga una autonomía de 30 minutos.

El control de la cinemática está distribuido en la serpiente, igual que en los sistemas biológicos. Cada sección dispone de un microcontrolador de 16 bits para el control de los motores y lectura de los sensores. Todos los controladores se comunican por el **CAN BUS**[22, 23].

Características técnicas de la serpiente con 5 secciones:

- **Longitud:** 90cm
- **Diámetro:** 18cm
- **Peso:** 10Kg
- **Consumo:** 20W

Se puede encontrar más información en [25]

2.3. Hirose & Yoneda Lab

En el Hirose & Yoneda Lab[26] se están realizando proyectos de investigación sobre robots serpientes[27]. Este laboratorio es uno de los precursores, por lo que muchos proyectos de otros centros de investigación se han basado en el trabajo realizado aquí.



Figura 13: snake2, en el BAR



Figura 14: ACM III (1972-1975)

2.3.1. ACM III

Creación del primer robot serpiente con un movimiento similar al de las serpientes reales (1972-1975)[28]. Está compuesto por 20 módulos, cada uno de los cuales dispone de un servo-mecanismo para girar a derecha o izquierda con respecto al módulo siguiente. El contacto con el suelo se realiza mediante unas ruedecillas, que permiten que los módulos puedan deslizarse hacia delante fácilmente, pero que ofrezcan mucha resistencia al deslizamiento lateral, lo que permite que la serpiente se impulse hacia adelante.

La cabeza de la serpiente describe un movimiento sinusoidal, que se va propagando hacia el resto de articulaciones a una velocidad constante. Las características del ACM III son:

- **Velocidad:** 40cm/sec
- **Longitud:** 2m
- **Número de secciones:** 20

Utilizando el robot ACM III como base, se han realizado unos experimentos muy interesantes, como los mostrados en la figuras 15 y 16. En ellos se han dotado a los módulos de sensores táctiles a ambos lados, de manera que la serpiente puede desplazarse por un laberinto adoptándose a su forma, así como bordear suavemente un objeto mientras avanza.

Se puede encontrar más información en [29, 30].

2.3.2. Soft Gripper

Se trata de una “pinza” o “agarrador mecánico” que adopta la forma del objeto que va a coger(fig 17), creando una fuerza que se reparte uniformemente por todo el objeto[31]. Ha sido probado en un prototipo pensado para levantar cuerpos humanos, sin que estos sufran ningún daño (fig 18). Si se utilizasen los manipuladores clásico, como pinzas, podrían hacer daño al



Figura 15: Robot ACM3 adaptándose a la forma de un camino muy tortuoso



Figura 16: Robot ACM3 adoptando la forma de un “corazón” a la vez que se desplaza

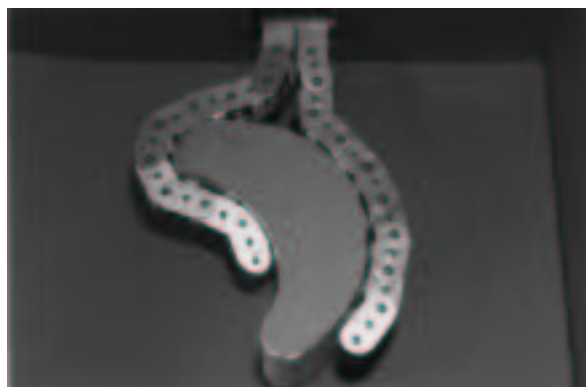


Figura 17: Soft Gripper



Figura 18: El agarrador robótica levantando a un niño

humano en las zonas de contacto. Con este prototipo la fuerza se reparte por toda la superficie de contacto.

El último prototipo se terminó en 1984. Se puede encontrar más información en [33, 34, 32].

2.3.3. Oblique Swivel Mechanism Arm (1979)

Prototipo de brazo hiper-redundante que se puede mover en las tres dimensiones, utilizando articulaciones oblicuas (**oblique swivel joints**), (ver figura 19).

Este tipo de articulaciones permiten construir serpientes más compactas y rígidas, que si se utilizasen articulaciones universales.

2.3.4. Active Endscope (ELASTOR)

Otras de las aplicaciones de los robot serpientes: endoscopio activo que se puede doblar y adaptar a la forma de los conductos que recorre (1980-86), bien para aplicaciones médicas o para inspeccionar el interior de determinada maquinaria (fig 21)[36]. Más información en [38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 42]

2.3.5. KR2

(1985-1992). Existen varias maneras de realizar un robot que se pueda desplazar por terrenos irregulares. Una de ellas es utilizar cuerpos articulados, como los de las serpientes (fig 22). Esto tiene las siguientes ventajas:

1. Posibilidad de transportar carga a través de superficies rugosas, caminos estrechos... distribuyéndose uniformemente la carga entre los diferentes segmentos.
2. Realizar diferentes tipos de movimiento de acuerdo con el tipo de terreno
3. Si un segmento se estropea, puede ser reemplazado por otro

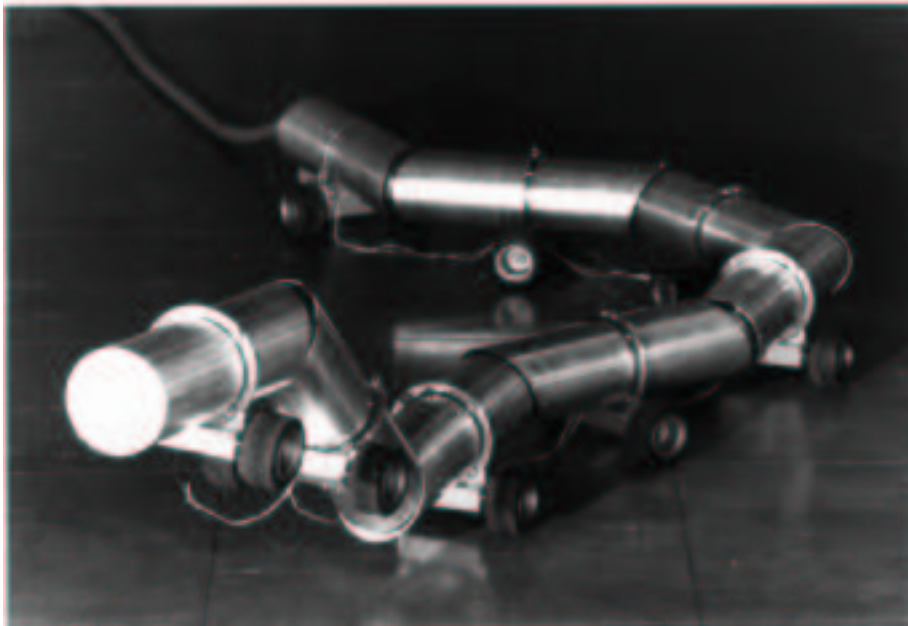


Figura 19: Oblique Swivel Mechanism

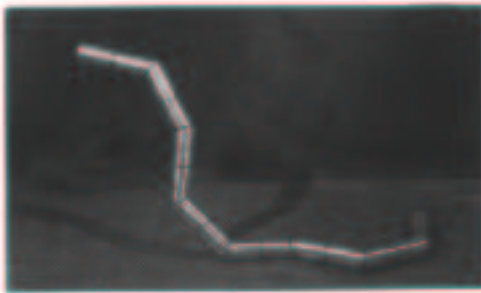


Figura 20: OBLIX. Robot serpiente construida a base de articulaciones oblicuas



Figura 21: Endoscope



Figura 22: KR2

4. Altamente transportable. El robot se puede transportar por módulos, que luego se ensamblan en el lugar de destino.

El robot KR-II(1989) está constituido por unidades cilíndricas, con tres grados de libertad: izquierda-derecha, lo que permite que pueda girar, arriba-abajo, para sobrepasar obstáculos y por último adelante y hacia atrás.

La longitud total es de 3.3 metros (cada segmento de 1.08m), con una anchura de 0.48m y un peso de 320Kg.

Más información en [47, 48, 49, 52, 51, 50, 53]

2.4. JPL

En el **Jet Propulsion Laboratory (JPL)** de la Nasa se utiliza un robot para la inspección remota en ambientes espaciales. La aplicación principal se centra en la inspección de la Estación Espacial. El robot está constituido por dos manipuladores de 7 grados de libertad montados en dos plataformas móviles de un grado de libertad. Estos brazos transportan cámaras y luces para las inspecciones. Sin embargo, es necesario un brazo más pequeño y hábil para inspeccionar zonas de difícil acceso.

En el **JPL** se ha desarrollado un robot serpiente para probar el acceso a estas zonas. El robot tiene un diámetro de 1.5 pulgadas y unos 3 pies de largo, pesa 6 libras y tiene 11 grados de libertad. En la figura 23 se muestra un trozo de este robot, constituido por 4 segmentos.

Para más información consultar [57]



Figura 23: JPL Visual inspection



Figura 24: copernicus

2.5. Proyecto Copernicus

Proyecto financiado por la Unión Europea, para el diseño y realización de un microrobot para la inspección de tuberías[58]. El robot está compuesto por módulos idénticos, como máximo 20, y un manipulador en la cabeza, junto con un sistema de visión. El robot debe ser capaz de moverse de manera autónoma, evitando posibles obstáculos.

El tipo de movimiento escogido es como el de los gusanos de tierra, como se muestra en la figura 24, en el que existe una onda de contracción que se propaga desde la cabeza hasta la cabeza.

Un esquema de los módulos se muestra en la figura 26.

El sistema de control del robot se encuentra en un ordenador central (con un kernel de tiempo real) que se comunica con los 20 módulos usando el **CAN BUS**[22]. Cada módulo está equipado con un microcontrolador de 16 bits, con un controlador CAN integrado (Siemens C167).

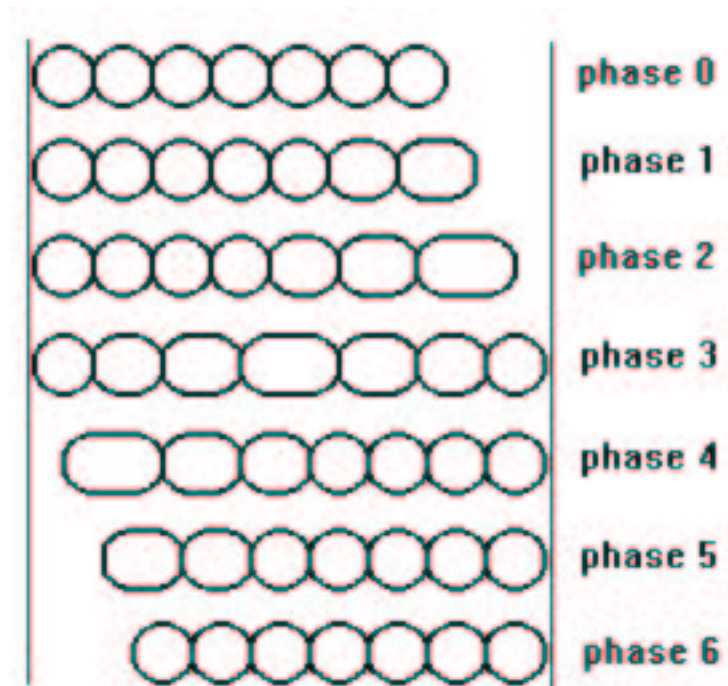


Figura 25: Movimiento de Copernicus

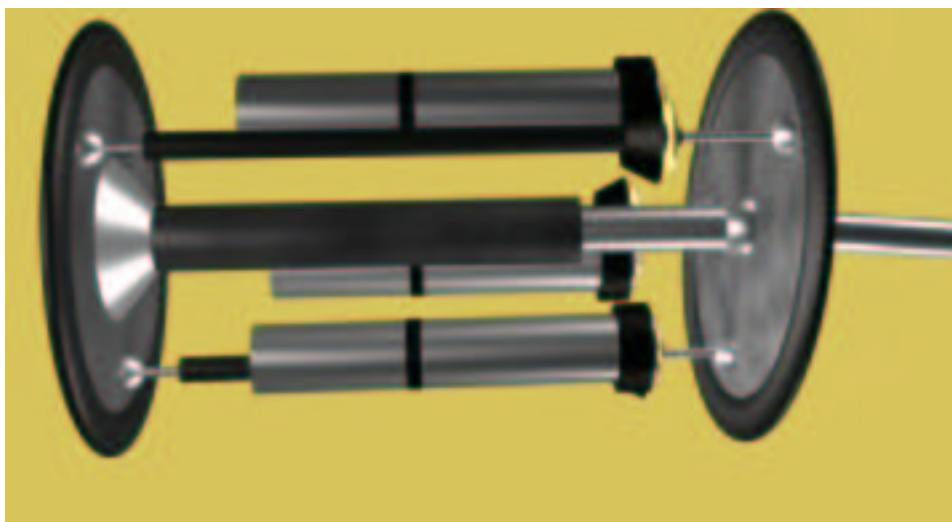


Figura 26: Modelo de módulo de copérnicus



Figura 27: R7



Figura 28: Prototipos S1 y S2

2.6. Beckam Institute of Advanced Science and Technology

En el **Computer vision and robotic**[60] del **Beckam Institute of Advanced Science and Technology** han desarrollado[59] el **robot R7**[61], para la inspección en 3D (fig 27).

Está constituido por 8 grados de libertad. Más información en [62]

2.7. Robots diseñados por personas particulares

2.7.1. Dr. Gavin Miller

En las figuras 28 y 29 se muestran los 4 prototipos de robots serpientes realizados por el Dr. Gavin Miller[63].

- **S1** (1992-93). Primer prototipo. Unidad de control con tecnología TTL. 14 servos, 16

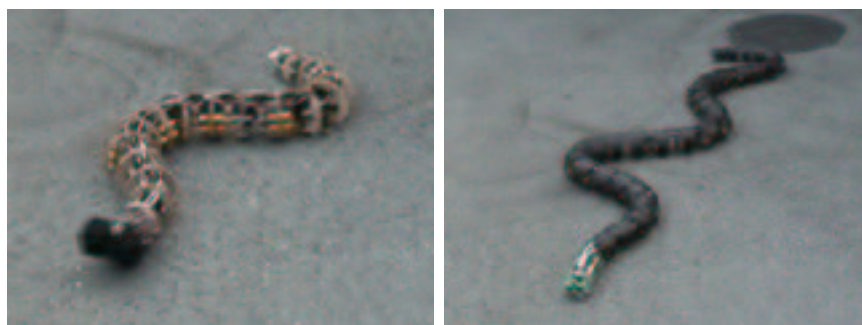


Figura 29: Prototipos S3 y S4

baterías, 2 canales radio. Está basado en el trabajo de Shigeo Hirose[28] en el Hirose & Yoneda Lab[26]. Para la propulsión utiliza ondas sinusoidales paralelas al suelo que recorren la serpiente desde la cabeza hasta la cola. Unas ruedas permiten que la serpiente se deslice longitudinalmente pero no lateralmente. El control se realiza mediante un mando a distancia. Con una palanca se especifica la velocidad y con la otra si el movimiento es hacia la derecha o a la izquierda.

- **S2** (1994-95). Variante de S1 en la que se ha mejorado el aspecto, ocultándose las ruedas el cableado.
- **S3** (1996-97). Utiliza dos microprocesadores Basic Stamp II, 35 servos, 24 baterías y 4 canales radio. Nuevo diseño de la sección de la serpiente. La estructura está constituida por un tren de articulaciones universales, con dos grados de libertad en cada segmento. La serpiente puede ondular verticalmente, además de horizontalmente. Sólo utiliza una rueda situada en la mitad de cada segmento.
- **S5** (1998-99). Dos microprocesador, un Basic Stamp II y un Scenix. 64 servos, 42 baterías y 4 canales radio. S5 es un refinamiento de S3. Las piezas están más elaboradas, lo que permite que la sección sea menor.

2.8. Slither

Robot creado por Mark Sherman[64], del Tennyson High School[65]. Para el desplazamiento se utiliza un movimiento sinusoidal, con ondas paralelas al suelo. También dispone de ruedas, no motoras, para ofrecer baja resistencia en el sentido longitudinal y mucha lateralmente.

Para realizar los giros hay que sumar una curva al seno, produciendo una onda sinusoidal curvada en una dirección.

Está constituido por 10 segmentos de aluminio doblado y 9 servos. Consume aproximadamente 1 amperio. El microprocesador empleado es un BasicX 24.

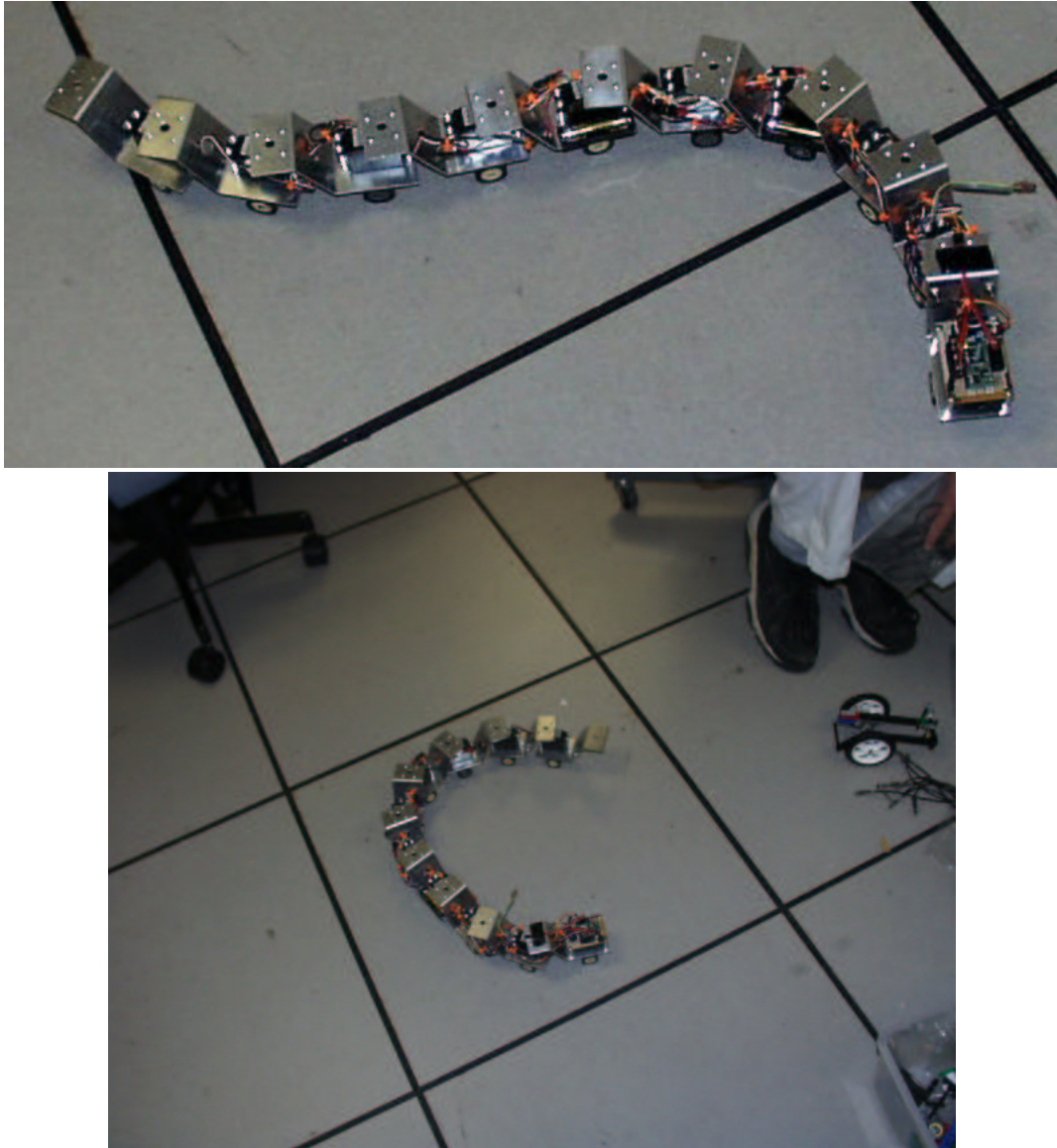


Figura 30: Slither



Figura 31: sniky

2.9. Sniky

Creado por Chabin Laurent[66]. Otro diseño más basado en ondas paralelas al suelo y segmentos unidos por servos(fig 31). Utiliza 8 servos. Sus datos son:

- Velocidad: 13cm/s
- Autonomia: 1h
- Peso: 1270gr
- Tamaño: 20mmx65mmx790mm.
- Consumo: 1.5A a máxima velocidad.
- 8 microprocesadores ST62E15, con 2Kbytes de EPROM y 64 bytes de RAM.

2.10. PARC (Palo Alto Research Center)

El **Palo Alto Research Center** es uno de los grupos más activos. En él han desarrollado el concepto de **Robótica modular reconfigurable** (Modular Reconfigurable Robotics)[68]. Es un nuevo enfoque para la construcción de robots para varias tareas complejas. En vez de diseñar una mecánica nueva y diferente para cada robot o tarea, se construyen muchas copias de un mismo



Figura 32: Polybot montando en un triciclo

módulo. Un único módulo no puede hacer nada, pero cuando se conecta a muchos módulos como él formado un sistema mayor se pueden hacer cosas complejas. Además, los robots modulares se pueden reconfigurar, cambiando de forma al mover sus módulos unos con respecto a otros, para ajustarse a nuevos entornos.

Se intenta responder a la pregunta: ¿Cuáles son las limitaciones en el número de módulos para un sistema robótico modular y reconfigurable?, ¿Cómo afecta el número de módulos?.

Las características de estos robots son:

- Versatilidad (diferentes formas)
- Robustez (Autoreparación y redundancia)
- Menor coste (Economía de escala?)

Todas las publicaciones se pueden consultar en [69].

Un ejemplo de este tipo de robots lo constituye **POLYBOT**[70]. Está constituido por muchos módulos repetidos. Cada módulo es virtualmente un robot. Dispone de un microprocesador, un motor, sensores y la habilidad para engancharse a otros módulos. Los módulos se unen formando cadenas, que pueden usarse como brazos, piernas o dedos, dependiendo de la tarea a realizar.

Entre las demostraciones de lo que este robot puede hacer, se encuentran desde mover cajas[71] (fig 33) hasta montar un triciclo[72](fig 32). En la figura 34 se muestra a Polybot convertido en una araña de 4 patas, que es capaz de caminar.

Existen varias generaciones de **Polybots**, cada una de las cuales dispone de módulos más avanzados[73].

2.11. G1 (1997)

En la figura 35 se muestra un esquema de estos módulos y la figura 36 fotos desde distintos ángulos.

Cada módulos está constituidos por un servo y dos piezas de plástico unidas a él. La electrónica y la alimentación son externas a ellos. Los módulos hay que unirlos a mano para construir el robot que se quiera (No tienen la capacidad de reconfiguración). Estos módulos han sido utilizados por investigadores de la Nasa.

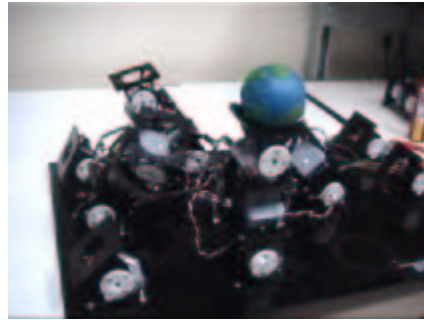


Figura 33: Polybot moviendo una pelota

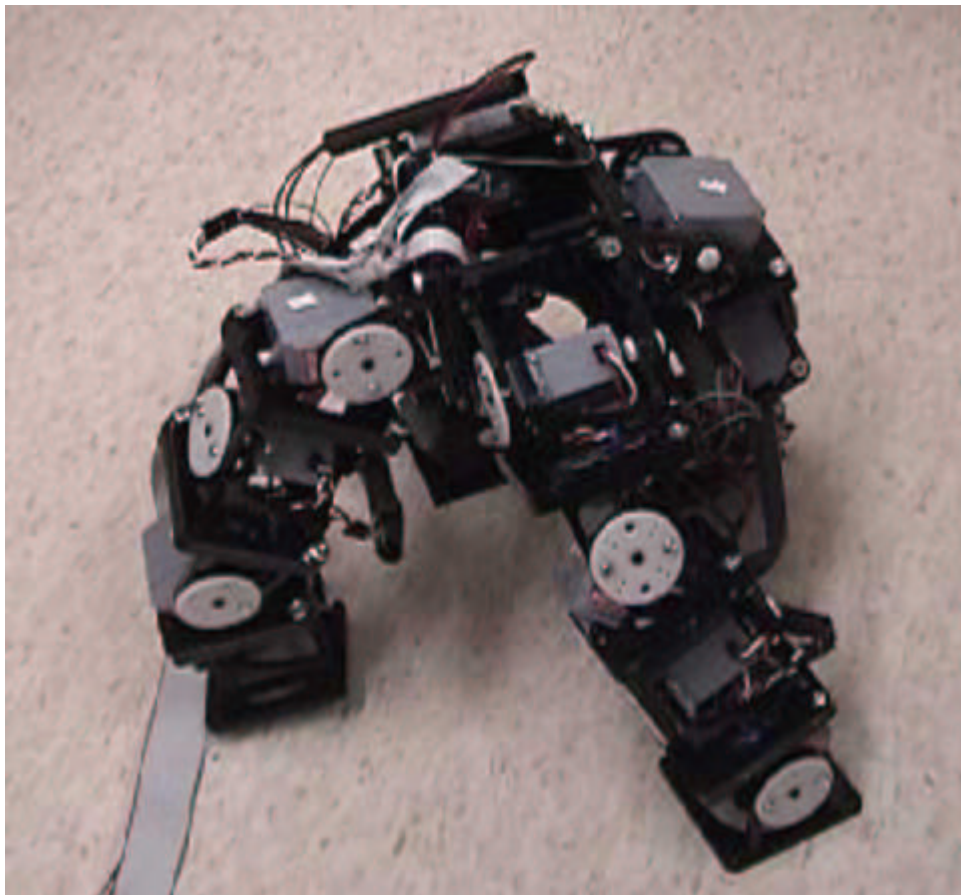


Figura 34: Spider

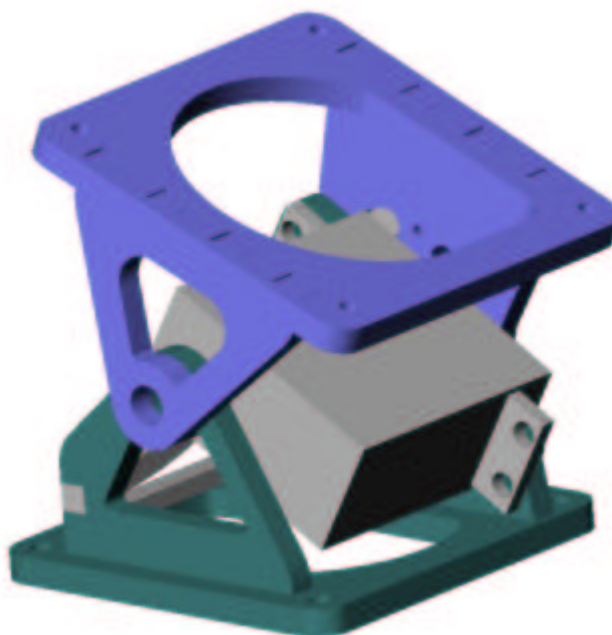


Figura 35: Esquema de los módulos G1

Los módulos se pueden unir con la misma orientación, por ejemplo para formar un robot serpiente que sólo pueda ondular en un plano, o bien se pueden unir con un desfase de 90 grados, de manera que se pueden construir serpeintes que se puedan mover por un espacio en 3D.

Los servos empleados con **S355M** de FMA Direct[76]. El consumo máximo de cada módulo es de 500mA, con una alimentación de 6V. Como CPU se empleó el microcontrolador **68hc11** de Motorola, para generar las señales PWM que controlan los servos e interpretar los ángulos enviados desde un PC a través de una conexión RS232. Más tarde se empleó el controlador de servos **miniSSC**[77].

2.12. G1V4

No es reconfigurable, sin embargo es muy fácil de configurarse a mano. Un único cable se conecta entre módulos para crear un bus de comunicaciones y alimentación. Cada módulo utiliza el mismo servo que en el caso de los módulos G1. Hay 4 conectores por cada módulo para la conexión de la alimentación y las comunicaciones.

La alimentación está dentro del propio módulo, usando Baterías de NiMH, así como un microcontrolador de 8-bit (PICF877). Todos los módulos se conectan por medio de un bus serie RS232 o RS485. Los módulos pueden funcionar en modo autónomo o bajo supervisión de un PC, que envía comandos mediante un enlace radio.

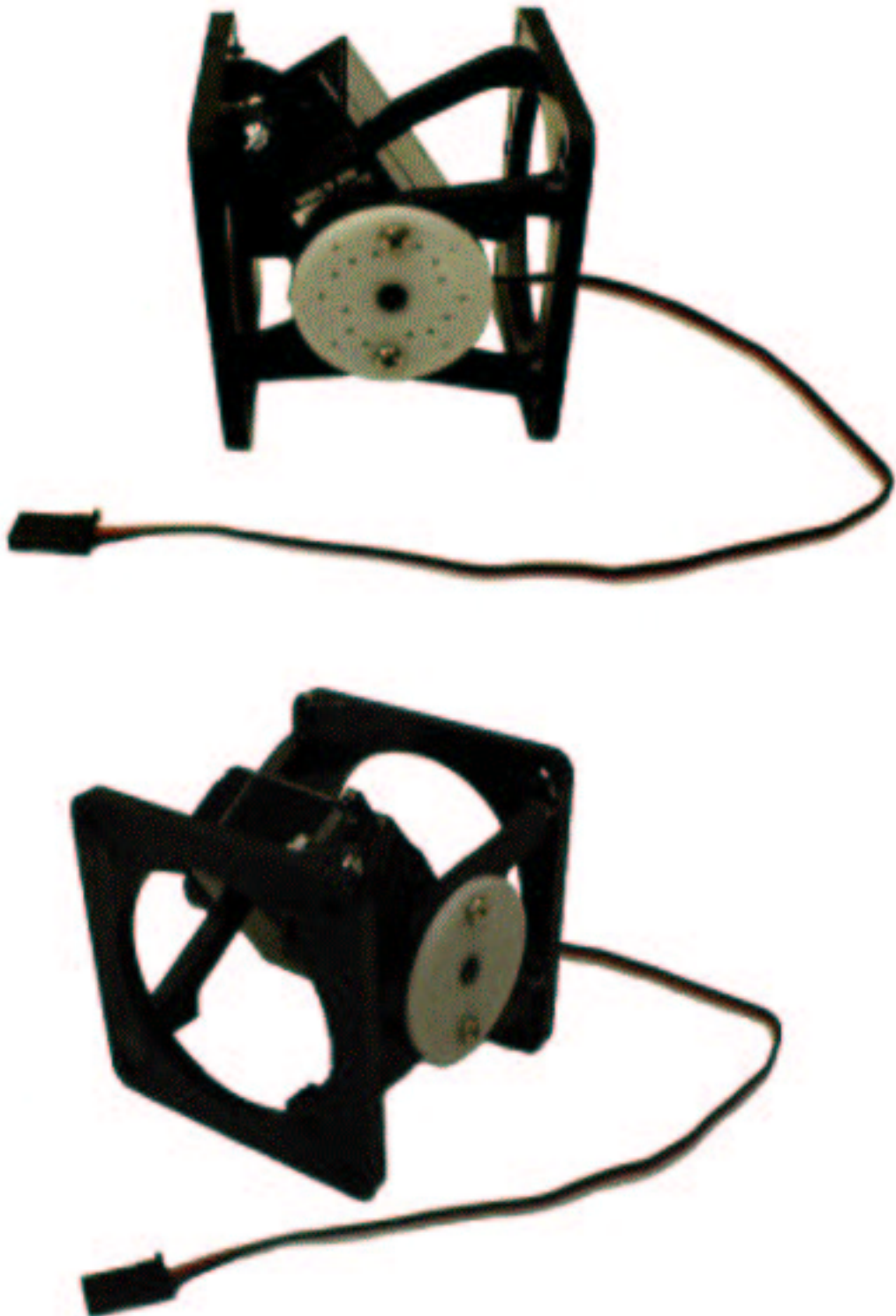


Figura 36: Fotos de los módulos G1

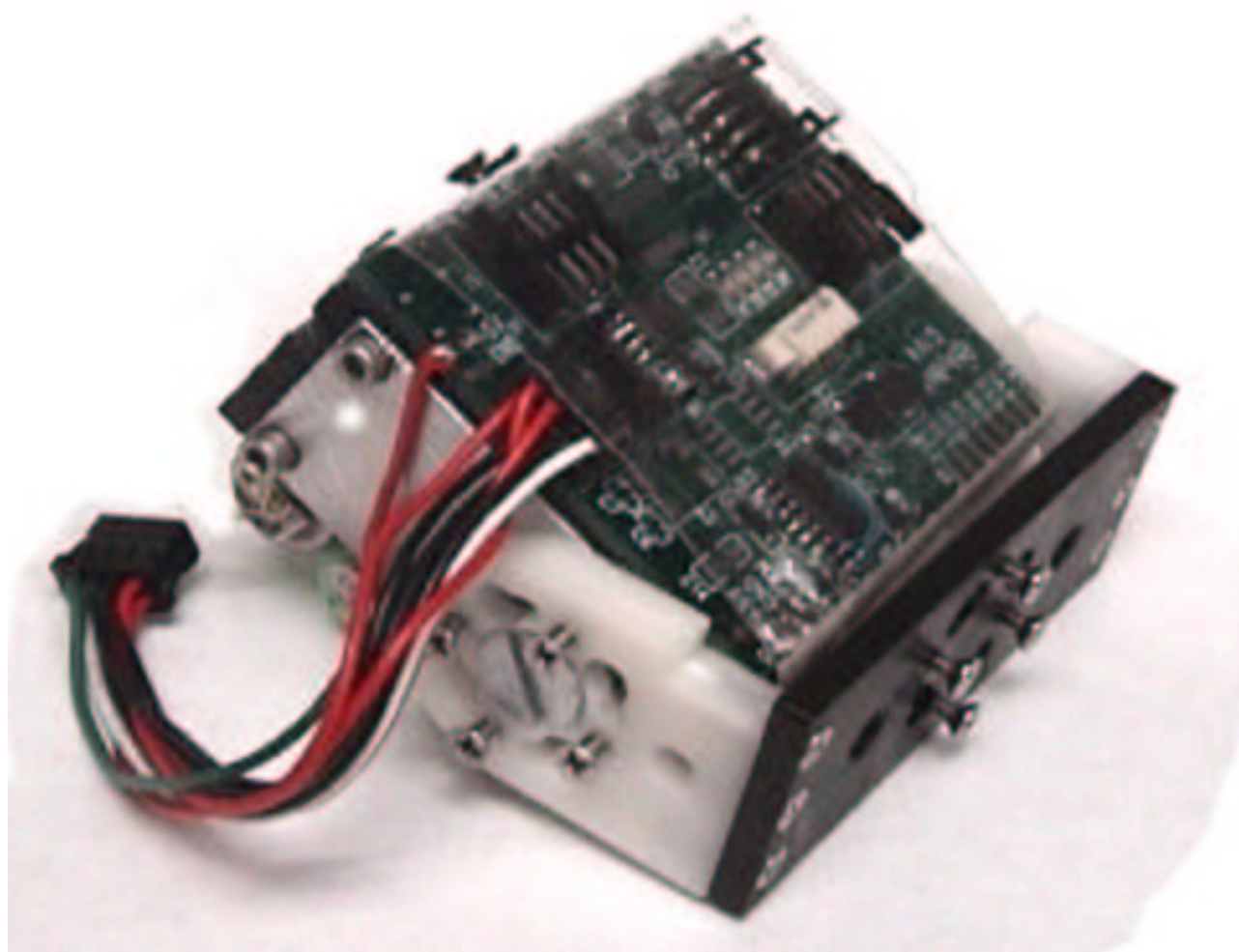


Figura 37: Módulos G1v4

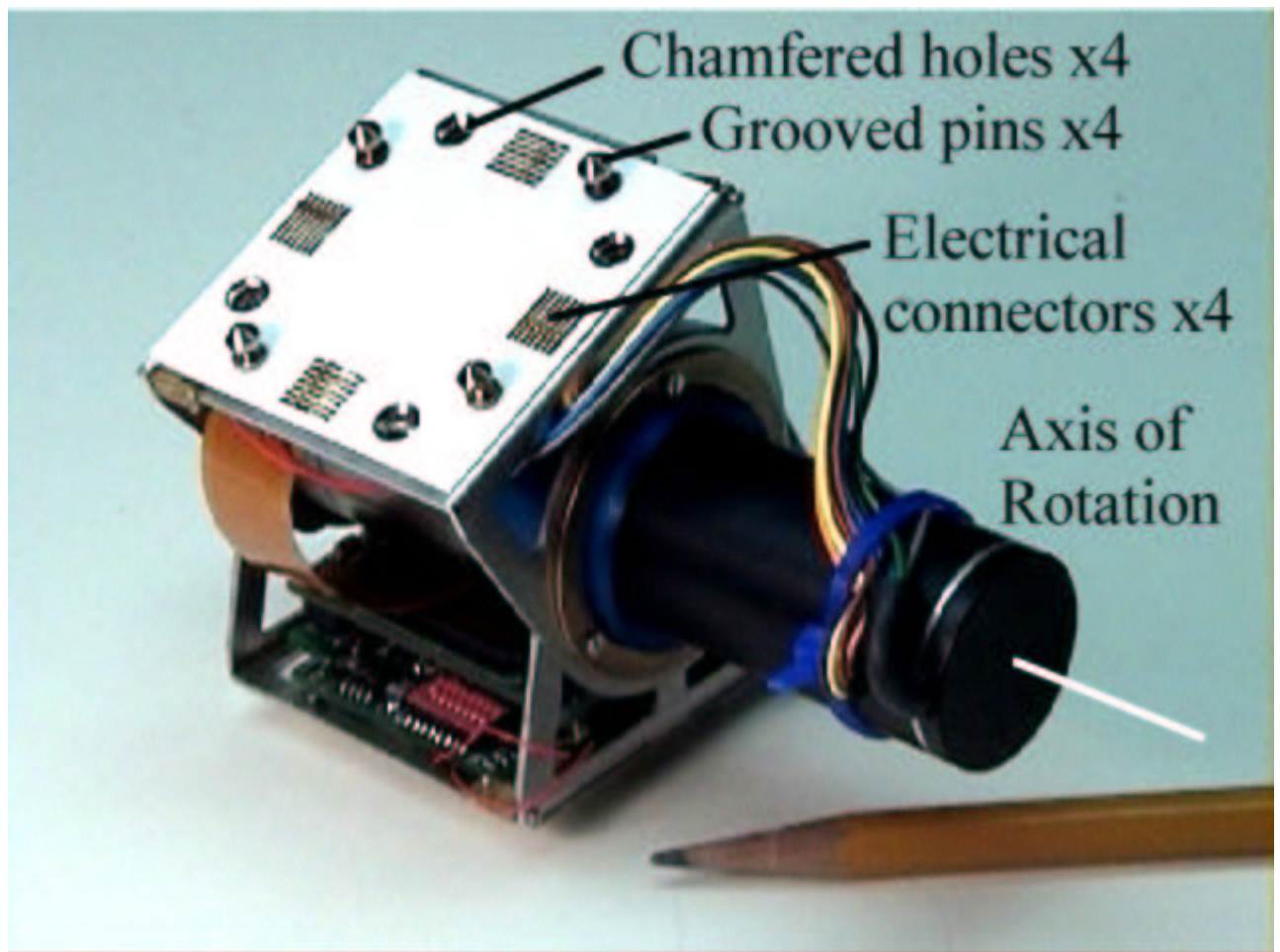


Figura 38: Módulos G2

2.13. G2

(Figura 38) Estos módulos tienen la propiedad de poder automáticamente conectarse y desconectarse unos de otros, haciendo que el sistema sea reconfigurable. Además son mucho más robustos y tienen una CPU mayor, un PowerPC 555 de Motorola, con 1 MB de memoria RAM externa. Para la comunicación se utiliza el **CANBUS**[22].

Dimensiones: 11x7x6cm. En vez de servos se utiliza un **motor DC sin escobillas**.

2.14. G3

(Figura 39) Esta generación está todavía en base de construcción. Caben en un cubo de 5cm. Utiliza un motor Maxin de 32mm de diámetro, sin escobillas. El peso total del módulo es de unos 200gr.

Cada cara dispone además de 4 leds infrarrojos y sensores para realizar el enganche durante



Figura 39: Modulos G3

la reconfiguración y comunicarse con el módulo adyacente. Esta comunicación se realiza inicialmente para que el robot sepa su configuración inicial.

Cada módulo contiene un Motorola PowerPC 555 con 1 MB de memoria externa. La comunicación con otros módulos se realiza a través del CAN BUS [22].

3. CONCLUSIONES

Las **aplicaciones** de los *robots tipo serpiente* son muy variadas, destacándose las siguientes:

- Inspección de zonas de difícil acceso
 - Inspección de tuberías
 - Inspección de puentes
 - Búsqueda y rescate
- Garras mecánicas
- Endoscopio
- Vehículos todo terreno
- Exploración espacial

En casi todos los robots analizados, existe una tendencia clara a la **modularización**, diseñándose este tipo de robots en base a módulos iguales que se repiten. Sin embargo esta idea de modularidad, nacida a partir de estos robots, se está extendiendo hacia otras áreas de la robótica y están apareciendo conceptos tan interesantes como el de **robótica modular reconfigurable**, en el que se construyen robots muy complejos (y ya no sólo robots de tipo serpiente) a partir de módulos muy simples. Y es precisamente con este concepto con el que se han desarrollado los robot ápodos más versátiles y más interesantes, siendo el **PARC**[67] el punto de referencia.

En cuanto a tecnología, los **microcontroladores** y **microprocesadores** son muy variados, abundando los de 8 y 16 bits, aunque en los últimos prototipos de Polybot[70] se están empleando de 32bits. Y lo mismo que se tiende a robots modulares, se está tendiendo a **distribuir la inteligencia** a lo largo del robot, de manera que cada módulo tienen su propio microcontrolador.

En la comunicación entre los módulos destaca el **CAN BUS**[22], que precisamente tiene unas características de inmunidad al ruido y distribución de la inteligencia que hace que se adapte muy bien para el diseño de robots modulares.

Los motores empleados son principalmente **servomecanismos** de aeromodelismos, de bajo presupuesto, salvo en algunos prototipos que se usan motores DC específicos. Esto tiene mucho sentido puesto que precisamente los robots ápodos son hiper-redundantes, de manera que tienen muchas más articulaciones de las necesarias. La calidad del movimiento no viene dada por la precisión de los motores sino más bien por una adecuada coordinación entre todos ellos.

Referencias

- [1] Robot humaniforme **Asimo**, de Honda. <http://world.honda.com/robot/>
- [2] Biomimetic Autonomous Robots Team (BAR Team). <http://ais.gmd.de/BAR/>
- [3] Ais (Institute for Autonomous Intellignet systems). <http://ais.gmd.de/>
- [4] German National Research. <http://www.gmd.de/>
- [5] Robot escorpión. <http://ais.gmd.de/BAR/SCORPION/>
- [6] Perro robot de Sony. <http://www.aibo.com/>
- [7] Carnegie Mellon University (CMU). <http://www.cmu.edu/>
- [8] Sensor Based Planning Lab en el CMU. <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/>
- [9] Robots tipo serpiente en el Sensor Based Planning Lab. <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/serpentine/serpentine.html>. A esta página también se tiene acceso a través de la URL <http://www.snakerobot.com/>
- [10] Search & rescue, Sensor Based Planning Lab en el CMU. http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/projects/prj_search_rescue.html
- [11] Motion Planning for Snake Robots. Sensor Based Planning Lab (CMU). http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/projects/prj_snake_motion.html
- [12] “Sensor-Based Construction of a Retract-Like Structure for a Planar Rod Robot”. Howie Choset and Ji Yeong Lee. IEEE Transaction of Robotics and Automation, Vol 17, No. 4, August 2001. Consulta on-line: <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/papers.english.html#har>.
- [13] “Sensor-Based Exploration: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph”. Howie Choset and Joel Burdick. The International Journal of Robotics Research 19, no. 2 (2000): 96-125. Consulta on-line: <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/papers.english.html#har>.
- [14] “Sensor-Based Exploration: Incremental Construction of the Hierarchical Generalized Voronoi Graph”. Howie Choset, Sean Walker, Kunyayut Eiamsa-Ard, Joel Burdick. The International Journal of Robotics Research 19, no. 2 (2000): 126-148. Consulta on-line: <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/papers.english.html#har>.
- [15] “A Follow-the-Leader Approach to Serpentine Robot Motion Planning”. H. Choset and W. Henning. ASCE Journal of Aerospace Engineering. Consulta on-line: <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/papers.english.html#snake>.
- [16] Bridge inspection, Sensor based Planning Lab (CMU). http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/projects/prj_bridgeinspection.html

- [17] Modular Serpentine Robot Locomotion. Sensor Based Planning Lab (CMU). <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/projects/modsnake/modsnake.html>
- [18] Movimientos de serpientes (gaits) objeto de estudio en el Sensor Based Planning Lab. <http://voronoi.sbp.ri.cmu.edu/projects/modsnake/gaits/>
- [19] Robot para inspección de alcantarillas. MAKRO. <http://www.ais.fraunhofer.de/projects/Makro/makro-engl/makro-e.html>
- [20] Empresa Inspector Systems, que utiliza el robot MAKRO para la inspección de alcantarillas. http://www.inspectorsystems.de/firmenportrait_e.htm
- [21] Robot serpiente en el BAR. <http://ais.gmd.de/BAR/snake.htm>
- [22] CAN homepage. <http://www.can.bosch.com>
- [23] “An introduction to CAN”. Peter Bagschik. http://www.ime-actia.com/can_intro.htm
- [24] Robot serpiente en el BAR. Snake2. <http://ais.gmd.de/BAR/snake2.htm>
- [25] Paper sobre snake2 del BAR. <ftp://set.gmd.de/pub/SET/publications/released/1999/pdf/Klaassen99.1.pdf>
- [26] Investigaciones de robótica en el Hirose & Yoneda Lab. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/>
- [27] Hirose & Yoneda Lab. Snake-like robots. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/snake.html>
- [28] ACM III. Hirose & Yoneda Lab. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/acm3/acm3.html>
- [29] “Biologically Inspired Robots (Snake-like Locomotor and Manipulator)”. Shigeo Hirose. Oxford University Press, 1993.
- [30] “Biomechanical Study of Active Cord-Mechanism with Tactile Sensors”. Yoji Umetani. Int. Symp. on Industrial Robots, Nottingham. pp.c1-1-c1-10 (1976)
- [31] Soft Gripper. Hirose & Yoneda Lab. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/sg/sg.html>
- [32] “The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand, Mechanism and Machine Theory”. Yoji Umetani. Pergamon Press, 13,,pp.351-359 (1978)
- [33] “The Kinematics and Control of a Soft Gripper for the Handling of Living or Gragile Objects”. Shigeo Hirose, Yoji Umetani. Proc. 5th.
- [34] Shigeo Hirose; “Connected Differential Mechanism and Its Applications”. Shigeo Hirose, Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Research ,, , pp.319-326 (1985)
- [35] OBLIX. Hirose & Yoneda Lab. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/oblique/oblique.html>

- [36] Elastor. Hirose & Yoneda Lab. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/endscope/endscope.htm>
- [37] KR2. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/kr2/kr2.html>
- [38] "Tensor Actuated Elastic Manipulator", Shigeo Hirose, Takashi Kado, Yoji Umetani; Proc. 6th IFToMM World Congress, New Delhi ,2, , pp.978-981 (1983)
- [39] "A New Design Method of Servo-Actuators Based on the Shape Memory Effect". Shigeo Hirose, Koji Ikuta, Yoji Umetani; , Proc. ROMANSY Symp '84., Udine, Italy, Kogan Page, London ,, , pp.339-349 (1984)
- [40] "Several Considerations on Design of SMA Actuator", Shigeo Hirose, Koji Ikuta, Masahiro Tsukamoto, Koichi Sato, Yoji Umetani; , Proc. Int. Conf. on Martensitic Transformation ,, , pp.1047-1052 (1986) .
- [41] "Considerations on Design of the Actuator Based on the Shape Memory Effect". Shigeo Hirose, Koji Ikuta, Masahiro Tsukamoto, Koichi Sato; , Proc. 7th IFToMM World Cong., Sevilla, Spain ,, , pp.1549-1556 (1987)
- [42] "Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback". Koji Ikuta, Masahiro Tsukamoto, Shigeo Hirose; , Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation ,, , pp.427-430 (1988)
- [43] "Development of Shape-Memory Alloy Actuators. Performance Assessment and Introduction of a New Composing Approach". Shigeo Hirose, Koji Ikuta, Yoji Umetani; . , Advanced Robotics ,3, 1, pp.3-16 (1989)
- [44] "Development of Shape Memory Alloy Actuator. Improvement of Output Performance by the Introduction of a σ -Mechanism". Shigeo Hirose, Koji Ikuta, Koichi Sato; , Advanced Robotics ,3, 2, pp.89-108 (1989)
- [45] "Development of Shape Memory Alloy Actuator. Measurement of Material Characteristics and Development of Active Endoscopes". Shigeo Hirose, Koji Ikuta, Masahiro Tsukamoto; , Advanced Robotics ,4, 1, pp.3-27 (1990)
- [46] "Mathematical Model and Experimental Verification of Shape Memory Alloy for Designing Micro Actuator". Koji Ikuta, Masahiko Tsukamoto, Shigeo Hirose; , Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems ,, , pp.103-107 (1991)
- [47] "Design of Practical Snake Vehicle: Articulated Body Mobile Robot KR-II,". S. Hirose, A. Morishima, S. Tukagosi, T. Tsumaki and H. Monobe; Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics, Pisa, Italy, pp.833-838 (1991)
- [48] "Basic Steering Control Methods for The Articulated Body Mobile Robot,". S. Hirose, E. F. Fukushima and S. Tsukagoshi; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA94), pp. 2384-2390, (1994)

- [49] "Basic Steering Control Methods for The Articulated Body Mobile Robot,". S. Hirose, E. F. Fukushima and S. Tsukagoshi; IEEE Control Systems Magazine, vol. 15, no. 1, pp. 5-14 (1995).
- [50] "How To Steer The Long Articulated Robot "KR-II", ".E. F. Fukushima and S. Hirose; Proc. of the 7th Int. Conf. on Advanced Robotics, pp. 729-735 (1995)
- [51] "Efficient Steering Control Formulation for The Articulated Body Mobile Robot "KR-II", ".E. F. Fukushima and S. Hirose; Autonomous Robots, vol. 3, no. 1, pp. 7-18 (1996)
- [52] "Basic Manipulation Considerations For The Articulated Body Mobile Robot,".E. F. Fukushima, S. Hirose and T. Hayashi; " Proc. of the 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems , pp. 386-393 (1998)
- [53] "Optimal Attitude Control for Articulated Body Mobile Robots,".E. F. Fukushima and S. Hirose; Proc. of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, CD-ROM proceedings, Montreal, Canada, August (2000).
- [54] CT-ARM. Hirose & Yoneda Lab. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp/research/snake/ct/ct.html>
- [55] Jet Propulsion Laboratory(JPL). <http://www.jpl.nasa.gov/>
- [56] JPL Serpentine robot. <http://robotics.jpl.nasa.gov/tasks/rsi/accomplishments/snake/snake.html>
- [57] " A Highly Redundant Robot System for Inspection,".Lee, T., Ohm, T., and Hayati, S., Proceedings of the Conference on Intelligent Robotics in the Field, Factory, Service, and Space (CIRFFSS '94), Houston, Texas, March 21-24, 1994, pp. 142-149.
- [58] Proyecto Copernicus. http://www.agip.sciences.univ-metz.fr/~mihalach/Copernicus_projet_engl.html
- [59] Beckman institute for advance Science and Technology. <http://www.beckman.uiuc.edu/>
- [60] Computer vision and robotic. Beckman institute. <http://uirvli.ai.uiuc.edu/>
- [61] R7. <http://uirvli.ai.uiuc.edu/tlewis/pics/snake.html>
- [62] "R7: A Snake-Like Robot for 3-D Inspection". M. Anthony Lewis and David Zehnpfennig , IROS 1994, Munich.
- [63] Página personal de Dr. Gavin Miller. <http://www.snakerobots.com/main.htm>
- [64] Robot serpiente Slither. <http://arctangent.8k.com/snake/snakemain.htm>
- [65] Tennyson High School. Hayward, California. <http://www.tennysonhigh67.com/>
- [66] Sniky. <http://chabin.laurent.free.fr/snake.htm>
- [67] Palo Alto Research Center(PARC). <http://www.parc.com/>

- [68] Modular Reconfigurable Robotics. PARC. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/index.html>
- [69] Lista de publicaciones en el PARC. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/publications/index.htm>
- [70] Polibot. PARC. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/index.html>
- [71] Demo de Polibot. Movimiento de cajas. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/demos/boxes.html>
- [72] Demo de Polibot. Montando en un triciclo. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/demos/tricycle.html>
- [73] Las generaciones de Polibot. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/index.html>
- [74] Polibot. G1. <http://www2.parc.com/spl/projects/modrobots/chain/polybot/g1.html>
- [75] Módulos diseñador por Mark Yim, empleados en el Sensor Based Planning Lab (CMU). <http://www.sbp.ri.cmu.edu/projects/modsnake/specs/subsyst.html>
- [76] Fabricantes de servos. FMA Direct. <https://www.fmadirect.com/site/home.htm>
- [77] Controlador de Servos Serie. MiniSSC. <http://www.seetron.com/ssc.htm>