

CIRUGIA DEL MAÑANA

Anita M. Flynn
K.R. Udayakumar
David S. Barret
James D. McLurkin
M.I.T., A.I. Lab,
Cambridge - USA

Los procedimientos quirúrgicos han cambiado radicalmente a través de los últimos años debido a la disponibilidad de nueva tecnología. ¿Qué nos traerá la tecnología en el futuro? Este capítulo examina algunas de las fuerzas que, actuando en cierto orden, permiten la formación de nuevas ideas en las áreas de inteligencia artificial, robótica, micromaquinaria y materiales inteligentes. Los sistemas de inteligencia para robots móviles autónomos, permiten ahora comportamientos simples a nivel de insecto, en pequeñas cantidades de silicio. Estos adelantos en software, junto con nueva tecnología para la microfabricación de sensores en miniatura y actuantes, tanto de silicio como de familias de materiales ferroeléctricos, ofrecen vislumbres de un futuro en el cual los robots serán pequeños, de bajo costo y potencialmente de mucha utilidad para los cirujanos. Aquí relatamos nuestros más recientes esfuerzos para fabricar micromotores piezoeléctricos con el fin de desarrollar tecnologías en actuantes, en las cuales la fuerza física va a la par con la inteligencia. Discutimos nuestros experimentos con motores de delgadas películas ferroeléctricas de 2 mm. de diámetro y versiones más grandes de 8 mm., trabajados en cerámica en bruto y esbozamos posibles aplicaciones en el campo quirúrgico.

MAQUINAS INTELIGENTES

Hoy en día, los cirujanos extirpan órganos rutinariamente utilizando procedimientos miniinvasivos, de los cuales no se había oído sino hasta pocos años atrás. ¿Qué seguirá?

Parece claro que manipuladores de mayor habilidad y con mejores herramientas de visualización son los próximos ítems en la agenda. Luego, quizás también colocar la inteligencia en un lugar de interés. Mientras que la idea de un robot autónomo enloquecido dentro de un cuerpo humano es alarmante, ciertamente es posible imaginar comenzar con acciones reflexivas de bajo nivel, ya sean locomotrices o de manipulación, llevadas a cabo en forma autónoma, mientras que un cable de fibra óptica se encuentra conectado a un cirujano quien observará y dirigirá. En el Laboratorio de Robótica Móvil de MIT, nuevos enfoques en cuanto a inteligencia artificial han llevado a arquitecturas de vanguardia en inteligencia, utilizadas en robots que exploran, elaboran mapas, cuentan con manipuladores a bordo, caminan, interactúan con personas, navegan visualmente y aprenden a coordinar varios comportamientos internos conflictivos. Este tipo de sistema de control, conocido como arquitectura de «subsumption», se implementa como una red distribuida en capas de máquinas de estado finito con capacidad aumentada de transmisión de mensajes, y permite una estrecha relación entre la percepción y la acción que se debe mantener en el dinámico mundo de un robot móvil.

En la Figura 1 se puede observar a Squirt, el robot más pequeño y más simple construido en base a este paradigma. Dos micrófonos y un sensor de luz activan comportamientos tipo insecto, tales como ocultarse en la oscuridad y acercarse a un sonido.

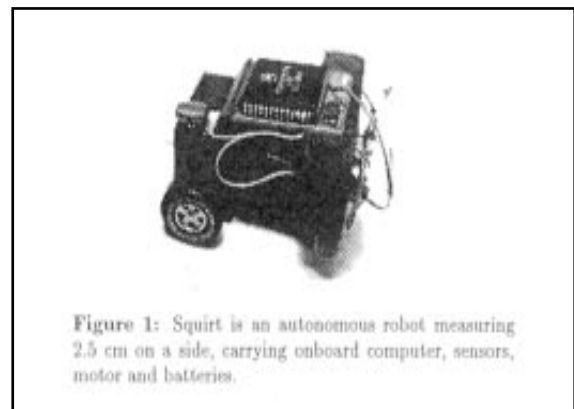


Figura 1 : Squirt es un robot autónomo que mide 2,5 cm, y que lleva a bordo computador, sensores, motor y baterías.

El programa de «subsumption» que dotó a Squirt de estas capacidades, cabe en unos módicos 1.300 bytes de código. Desafortunadamente, el motor DC con transmisión de engranaje con el que cuenta Squirt sólo permite un grado de libertad; hacia delante y hacia atrás y viraje (cuando el embra-

que del eje trasero permite el deslizamiento de una de las ruedas). Mientras que un computador entero, con software, sensores y baterías correspondientes cabrían dentro de un paquete del tamaño de Squirt, sería difícil incluir suficientes motores como para permitir una destreza más fina. Con el advenimiento de nuevas técnicas de micromaquinación en silicio, en las cuales motores electrostáticos del tamaño de un cabello humano pueden ser implantados en la superficie de un chip de silicio, surgió la idea de configurar un robot entero en un chip; sensores, sistemas de control de «subsumption», compilados a nivel de entrada, actuantes y células solares, ya que todos los componentes pueden ser fabricados en silicio. Las máquinas resultantes podrán ser impresas en la misma forma que se imprime circuitos integrados y producidas masivamente, en grandes cantidades y a bajo costo, lo que permitirá la producción de robots desechables baratos. Lamentablemente, el problema yace en el hecho que los motores electrostáticos de silicio presentan una serie de desventajas al ser utilizados en pequeños robots. Normalmente giran a altas velocidades, con un bajo torque, el cual es muy difícil aumentar; por lo tanto, se hace necesaria la reducción del resto del sistema a su nivel. Estaríamos interesados en motores un poco más grandes, pero aún pequeños, que sean compactos, de transmisión directa, costo razonable y cuyo torque útil pueda adaptarse a la carga, con el fin de crear robots que actúen autónomamente como sensores y logren encontrar su camino hacia lugares difíciles de alcanzar. Varias tecnologías se ven prometedoras en este sentido, tales como motores oscilantes electrostáticos o magnéticos, geles poliméricos para músculos artificiales y motores piezoeléctricos ultrasónicos. Nuestras investigaciones se concentran en la reducción a escala del tamaño de los motores ultrasónicos e intentar su microfabricación utilizando nuevas delgadas películas ferroeléctricas de Circonato de Titanato de Plomo (PZT).

Materiales Inteligentes

La Figura 2 ilustra por qué consideramos intrigante el

romper el esquema del microprocesamiento de silicio tradicional e introducir delgadas películas de PZT en la microfabricación de robots.

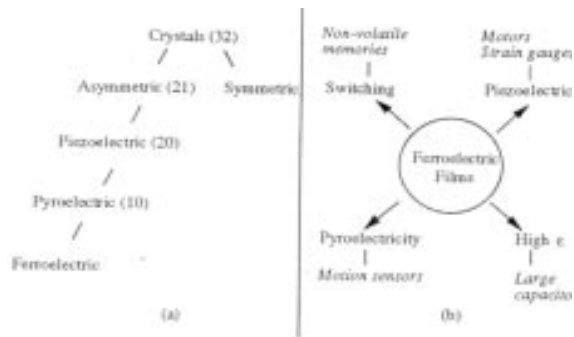


Figure 2: (a) Subsets of asymmetric crystal classes exhibit the effects of piezoelectricity, pyroelectricity and ferroelectricity. (b) These effects can be used to create capacitors, memories, sensors and actuators.

Aunque los materiales ferroeléctricos tales como PZT tienen altos coeficientes dieléctricos ($\epsilon = 1300 \epsilon_0$) y una relación histerética entre polarización y campo eléctrico, haciéndolos por ende excelente material para condensadores y memorias no volátiles, los ferroeléctricos también exhiben efectos piroeléctricos y piezoeléctricos.

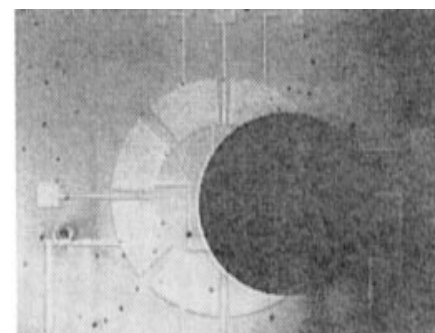
Figura 2: A) Esquema de cristal asimétrico que exhibe efecto piezoeléctricos, piroeléctrico y ferroeléctrico. B) estos efectos pueden ser usados para crear capacitores, memorias y sensores.

El efecto piroeléctrico es un cambio en la densidad de la carga cuando el material es uniformemente calentado y el efecto piezoeléctrico es una reacción similar cuando el material es sometido a esfuerzo. Los efectos piroeléctrico y piezoeléctrico pueden ser utilizados para crear sensores de movimiento y fuerza, respectivamente. El efecto piezoeléctrico puede ser aplicado en forma inversa, donde el voltaje aplicado resulte en la deformación del material. Los actuantes piezo se basan en esta última característica. Entonces, muchos de los componentes de un robot pueden ser fabricados por medio de agregar este material al proceso tradicional del silicio.

Figura 3: Una delgada película de PZT se usa para fabricar micromotores piezoeléctricos.

Motores

La figura 3 es una fotografía de la estructura de un micromotor de delgadas películas de PZT de 2 nm., fabricada en una membrana de nitride de silicio de 1 μm de espesor. Un pequeño lente de vidrio plano-convexo colocado sobre el substrato es utilizado como rotor y gira a 100-200 rpm por 90 Khz de excitación a 5 V.



Estas estructuras iniciales validaron el uso de este tipo de películas como actuantes pero no cuenta con empalmes o mecanismos para empalmar energía. Los motores ultrasónicos más grandes, populares en Japón, utilizan PZT cerámico en bruto en una configuración anular, como se muestra en la Figura 4.

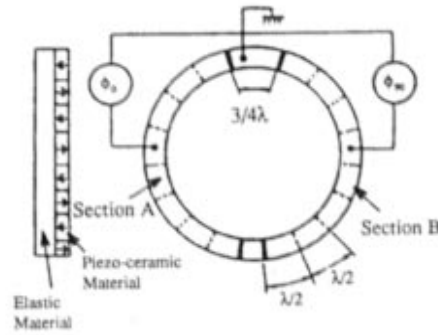


Figura 4: Dos ondas estacionarias combinadas para formar una onda de deformación movable.

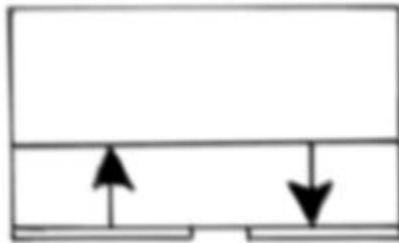


Figura 5: Las vecindades de los electrodos, al alternar la polaridad pueden estirarse opuestamente cuando llevan voltaje común.

La figura 5 ilustra los principios básicos detrás de un motor ultrasónico del tipo anular.

El PZT cerámico en bruto es adherido por segmentos a un cuerpo elástico como el acero. Se aplica un campo eléctrico considerable a cada segmento, opuestamente, para inducir la dirección inicial de la polarización.

Cuando todos los segmentos se encuentran conectados y son accionados con un voltaje común, los segmentos vecinos hacen fuerza en direcciones opuestas causando la curvatura de la estructura. Voltaje aplicado en forma oscilante, convierte el patrón de curvatura en una onda constante de deformación mecánica. Los motores ultrasónicos del tipo anular superponen dos ondas constantes, las cuales se encuentran desfasadas en un cuarto de longitud de onda tanto en espacio como en tiempo (figura 4) para generar una onda de flexión ambulante. La onda ambulante tiene la propiedad que cualquier punto de la superficie del haz sigue un trayecto elíptico, perpendicular al plano del anillo. Un rotor

presionado contra la superficie es entonces propulsado por medio de fricción. Este tipo de motor por lo tanto, genera un alto torque a bajas velocidades y no requiere engranajes. Actualmente estamos experimentando con versiones más pequeñas de motores ultrasónicos de cerámica en bruto, pero éstas aún son más grandes que las estructuras de delgadas películas en membranas.

La Figura 6 muestra un estator de un motor ultrasónico de 8 mm de diámetro. Mientras que el PZT cerámico en bruto requiere de altos voltajes (normalmente 50-100 V) para lograr los campos de fuerza requeridos, el PZT en delgadas películas es 500 veces más delgado y puede operar directamente desde baterías sin necesidad de recurrir a convertidores CD-CD.

Dado que los motores pueden también funcionar sin engranajes con un sistema de transmisión directa, se puede reducir considerablemente el peso de un robot móvil.

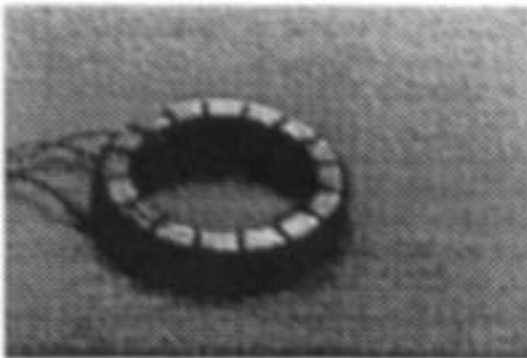


Figura 6: El stator de un motor ultrasónico de 8 mm construido de cerámica montado en un anillo de acero.



La Figura 7 muestra nuestros estatores de delgadas películas de PZT, de las mismas dimensiones del estator de tipo anular en la Figura 6, las cuales han sido microfabricadas a través de un proceso que utiliza láser y que no requiere máscaras ni grabado al agua, ofreciendo una producción potencial de bajo costo. Figura 7: Los stator de motor ultrasónico procesados al láser son capas comprimidas de óxido, titanio, platino, PZT y oro, en un sustrato desilicona.

ROBOTS EN MINIATURA

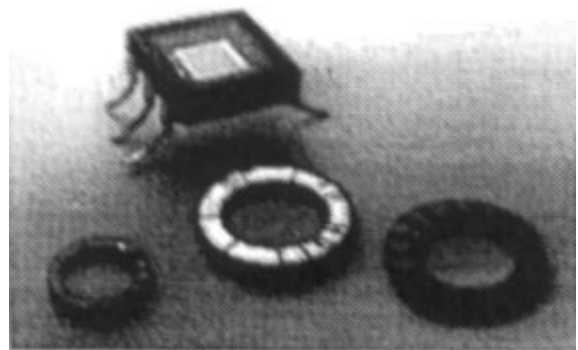
(Mini Robots) Si se encontrara disponibles pequeños motores compactos útiles, ¿qué tipos de sistemas construiríamos y qué rangos de velocidades y torques requeriríamos? Esencialmente, querríamos motores del mismo tamaño de los sensores que utilizamos hoy en día. Esto es especialmente cierto para robots cuya función es recolectar información en lugar de operaciones de montaje que requieren levantar peso. A continuación describimos varios sistemas factibles.

Carro Acarreador de Cámara de un centímetro cúbico

Usando la estrategia de producir en serie la mitad de un motor y montar a mano el resto, es concebible la construcción de un sistema muy útil usando motores de 8 mm, un pequeño robot teleaccionado que impulse una cámara. En robots anteriores hemos utilizado captadores de imagen serial 192 x 164 CCD (Dispositivo Acoplado por Carga) en paquetes de seis pins (fabricados por Texas Instruments y mostrados en la Figura 7). Esta cámara sería aproximadamente del mismo tamaño que nuestro motor. Nuestra intención es usar dos motores de 8 mm de transmisión directa montados superficialmente en tarjetas flexibles con circuitos impresos que se doblarían para formar el chasis de un carro como se muestra en la Figura 8.

Figura 8: Dos piezomotores de 8 mm con anillos de goma envuelto alrededor de los motores pueden servir como neumáticos para un carro de acero.

Pequeños anillos de goma se insertan en el rotor y servirán como neumáticos para las ruedas movilizadas por el piezomotor. Se instalará cables desde los estatores hasta el conector de la trailla. El chip de la cámara y un pequeño lente se montan en el alerón superior de la tarjeta flexible con circuitos impresos y una ruedecilla en la parte in-



ferior le permite tres posiciones.

El paquete completo mide a grosso modo un centímetro cúbico y tiene el doble de la libertad de movimiento con que cuenta Squirt.

Micro Trepadores

Otros métodos de locomoción además de ruedas pueden resultar de utilidad para los microrobots. A continuación mostramos un diseño simple e indicamos los requerimientos de torque para un trepador de seis patas que incorpora doce micromotores piezoeléctricos (Figura 9).

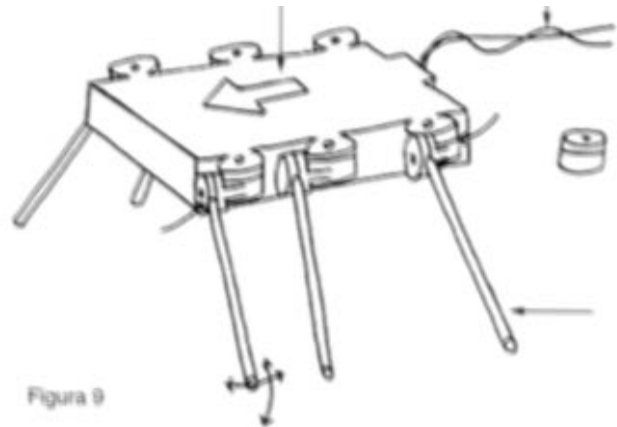


Figura 9: Las características de un piezomotor (alto torque y baja velocidad) significa que puede ser usado bajo conducción directa, lo cual es conveniente para robots, especialmente aquellos con varios grados de movimiento, tal como este móvil de 6 piernas.

Cada cadera contiene dos motores marcados a y b (para avanzar y balanceo respectivamente). El robot se desplaza en forma tripódica y su energía proviene de fuera de borda a través de una traílla. Los motores b deben ser capaces de soportar 1/3 del peso total del trepador y levantar la pata hasta que no toque el piso. Los motores llevan una carga mucho más ligera, por lo tanto bastará con el diseño de b. ¿Qué tipos de torques y fuerza se requiere?.

La Tabla 1 señala dimensiones y materiales para un diseño específico de trepador. En el desplazamiento de tipo tripódico, tres patas están en el aire al mismo tiempo.

Table I. Bug parameters and torque requirements.

Body	2.5 cm×6.4 mm×3.2 mm
(Aluminum)	$\rho = \text{density} = 2706 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Motors	3.2 mm dia.×3.2 mm long
(Silicon)	$\rho = \text{density} = 2596 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Legs	1.3 mm dia.×9.5 mm long
(Steel)	$\rho = \text{density} = 7731 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Leg weight	0.9 g
Total weight	2.07 g
Torque - support	4.6×10^{-4} kgf-cm
Torque - lifting	4.5×10^{-5} kgf-cm
Power - lifting $\frac{1 \text{ rad}}{\text{s}}$	4.5×10^{-5} W/motor
Power - total	1.35×10^{-4} W
Current at 5 V	2.7×10^{-5} A

In a tripod gate, three legs are in the air at any one

El peso total incluye el cuerpo, seis motores y tres patas.

El torque máximo requerido para que cada uno de los tres motores pueda sostener un tercio del peso total del cuerpo es calculado cuando las patas tocan el suelo y se encuentran en un ángulo de 45 grados respecto al cuerpo. La fuerza requerida por cada motor se calcula como si se proveyera este torque a una tasa de un radián por segundo. La tabla 1 nos da una idea del torque y fuerza estimados que un pequeño robot podría requerir. En este caso, el torque requerido es de 4.6×10^{-4} kgf-cm.

Micro Sumergibles

Figura 10: Un submarino robot de 2, 5 cm de largo incorpora un micromotor piezoeléctrico para propulsión.

El sistema de propulsión utilizado por un robot submarino podría ser similar a aquel ilustrado en la Figura 10. Un robot flotante o sumergible sería bastante más fácil de diseñar que uno que camine porque un nadador con flotación neutra puede cargar peso equivalente al agua que desplaza.

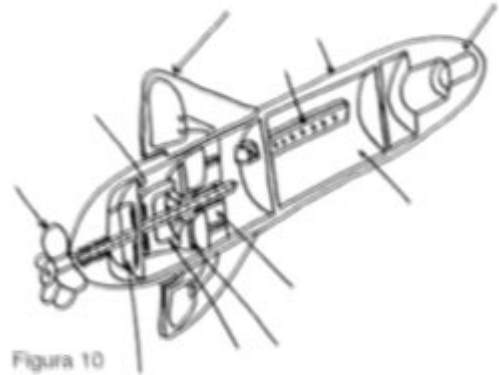


Figura 10

Para permitirnos calcular los tipos de torques que requeriría un pequeño submarino, deberemos suponer que dicho submarino tiene forma cilíndrica y tiene un diámetro de 5 mm y una longitud total de 25 mm. También supondremos que el motor también es cilíndrico y mide 4 mm de diámetro y 3 mm de largo. La fuerza de resistencia al avance en el agua es una función del coeficiente de resistencia al avance, la densidad del agua, la velocidad del submarino y el área que atraviesa. Esto nos indica que los requerimientos de torque y fuerza para sistemas de flotación neutra pueden ser bastante reducidos. Estas son buenas noticias para la medicina, ya que robótica en tubos llenos de fluidos en el cuerpo humano es sólo ingeniería oceánica en pequeña escala.

EL FUTURO

Ha ocurrido una revolución en el área quirúrgica en los últimos años pero aún falta lo mejor. Los instrumentos laparoscópicos y endoscópicos extienden las manos y ojos de los médicos, pero por lo general, el cirujano es el solista en la actuación de un cuarteto. Puede que en el futuro, su rol sea el de director de una orquesta, donde un equipo de micro ayudantes encuentran su camino a través de un laberinto de tubos en el cuerpo, llevando sensores e instrumentos y liberan al cirujano de la agotadora carga que representa cada actividad de bajo nivel.

Micro Ayudantes (micro internos)

Con un equipo de robots ayudantes, los cirujanos tienen acceso a sistemas mecánicos paralelos bajo control supervisor, donde el supervisor y los ayudantes trabajan en una relación amo-esclavos a través de una conexión vía fibra óptica o radio. Una vez que se haya establecido este nivel de cirugía teleconducida, el empalmar dicha conexión a expertos geográficamente distribuidos a través del globo es tan sólo un brinco conceptual. Así, el especialista en pulgar derecho en Boston o el especialista en ortejo izquierdo en Chile, pueden ayudar al mismo paciente en Siberia. Micromotores y microrobots tienen un alto potencial en variados procedimientos médicos. Desde el tubo digestivo al sistema vascular, máquinas autónomas podrán actuar como sistemas liberadores de droga, excavadoras, moledoras, observadores, esfínteres artificiales, bombas auxiliares, válvulas, filtros autolimpiantes, represas móviles o endoscopios autónomos. Sensores químicos, sensores de presión y flujo son hechos rutinariamente con microchips de silicon. Si le pudiéramos agregar un poco de capacidad de sensor, un poco de inteligencia y un poco de actuación podrían ser dispuestos para implementar implantes que monitoreen y controlen flujos de variadas clases. ¿Cómo serán estos microrobots médicos? Las figuras 11 a 14 muestran algunos posibles sistemas de propulsión. El movimiento dentro de un tubo puede obtenerse como el movimiento de propulsión por arrastre o como un movimiento palmo a palmo piezoeléctrico, el cual alternativamente se bloquee, ex-

tiende y luego contrae, permitiéndole avanzar dentro del tubo. La figura 13 muestra otra forma de navegar dentro de un tubo, con una especie de paraguas que permite que el flujo lo haga avanzar y con un mecanismo que lo haga abrirse y enclavarse en su lugar de destino. Para terrenos más rugosos, microrobots cilíndricos con 4 mecanismos de oruga tipo tanque, permitirán que se desplace apoyando sobre las paredes como muestra la figura 14. Para la energía, pueden instalarse pilas a bordo, o enviada a través de un cable o quizás una turbina generadora de corriente aprovechando el flujo de la sangre, como lo muestra la figura 15. Para tareas de demolición y limpieza, mini excavadoras asociadas a submarinos observadores, harán la tarea como lo muestra la figura 16.

Figura 11: Un robots gusano se arrastra por un tubo usando el serpenteo.

Figura 12 : Un robot utiliza el mecanismo de 2 anillos para fijarse, estirarse y acortarse para moverse dentro de un tubo.



Figura 13: Un paragua - bote navega en la corriente sanguínea el cual es enganchado cuando el robot alcanza el punto de interés.

Figura 14: Este cuadradoser progresa a través de tubos mientras se adhiere a la pared con 4 orugas.

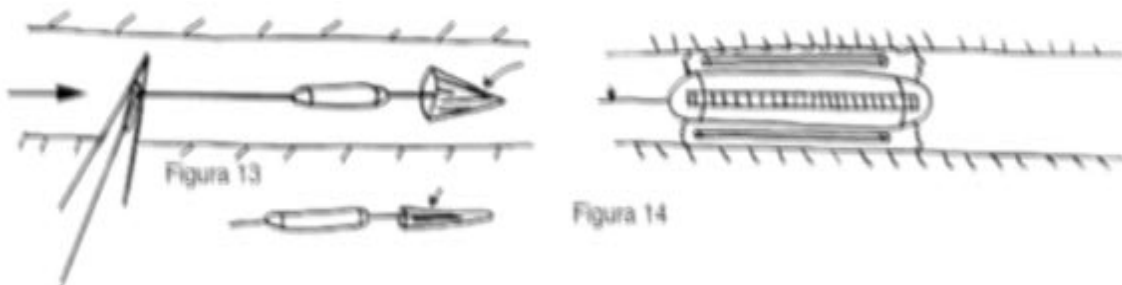
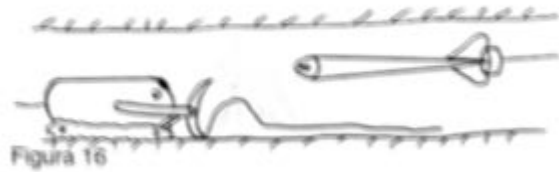
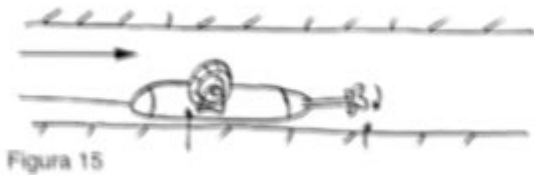


Figura 15: Una turbina genera fuerza de la energía obtenida por las corrientes.

Figura 16: Este equipo de demolición escava una placa dentro de un vaso sanguíneo.



NUESTRO ESTADO DEL ARTE

Recientemente, hemos desarrollado un robot autónomo altamente integrado que contiene muchos más sensores y actuantes que Squirt, pero es casi del mismo tamaño. El robot llamado Cleo e ilustrado en la Figura 17, contiene 3 motores, 17 sensores, un computador a bordo, una garra, batería y un convertidor DC-CD. Se han escogido sensores para emular las capacidades sensoriales de las hormigas y los comportamientos programados en el sistema de inteligencia generan comportamientos de hormiga tales como trasladarse hacia la luz y buscar alimento. Si no hay alimento en la mandíbula, el comportamiento **CHG-MD-NF** (cambiar de estado de ánimo si no hay alimento) envía una señal a la caja multiplexora marcada **MOOD** para que acepte comandos actuantes generados por el set inferior de comportamientos, etiquetado Estado de Animo de Búsqueda de Alimento. Entonces, el comportamiento de más bajo nivel, **MOVERSE (MOVE)**, manda a Cleo moverse hacia adelante en línea recta.

El comportamiento **IR HACIA LA LUZ (GOTO-LIGHT)**, cuando es iniciado por un nivel de luz que sobrepasa cierto umbral, manda al robot moverse en dirección de la mayor luz, suprimiendo el movimiento en línea recta.

Luego de moverse por un rato, el robot se topará con una pared y esto activará **BUSQUEDA (FORAGE)** que manda al robot buscar alimento cerca de una pared, lo cual suprimirá su movimiento hacia la luz.

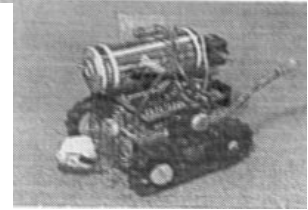
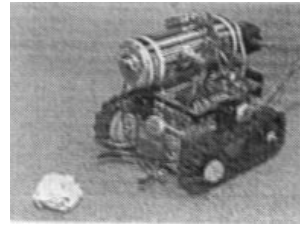
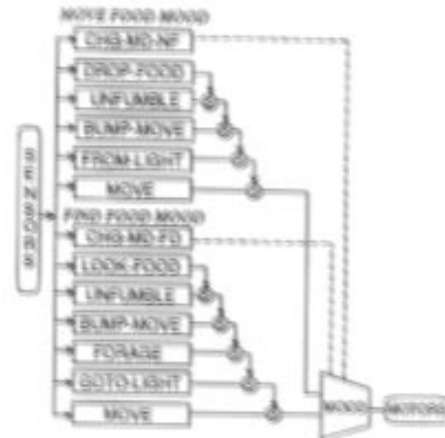


Figura 17: Cleo recogiendo comida. «La comida» es una bolita de aluminio, la cual es conductiva y de esta forma puede ser sensada y continuamente sujeta a test en el interior de las mandíbulas.

De manera similar, **GOLPE-MOVER (BUMP-MOVE)** hace que Cleo retroceda cuando sus bigotes detectan un obstáculo y **ARREGLAR (UNFUMBLE)**, revisa los sensores de la mandíbula para comprobar si la carga de Cleo es la bola de aluminio que creía cargar. Si Cleo deja caer el alimento, tratará de recogerlo nuevamente. **BUSCAR-ALIMENTO (LOOK-FOOD)** es un comportamiento de más alto nivel aún, que hace que las mandíbulas levanten las bolas de aluminio cuando Cleo las siente en sus mandíbulas. Varios de los sensores utilizados para crear estos comportamientos pueden observarse en la Figura 17. Cuatro fotos-reóstatos para detectar la luz se montaron en los lados, frente y parte posterior. Un detector infrarrojo de corta distancia se instaló junto a cada foto-reóstato para comunicar estados de ánimo a otras hormigas. La garra o mandíbula contiene tres sensores de «alimento», los cuales son simples puntos de prueba de continuidad que detectan si tiene pellets de «alimento» (papel aluminio) entre las mandíbulas. Bigotes, que se extienden más allá de la mandíbula, detectan obstáculos o pellets de alimentos, y con sistema en simples alambres que atraviesan ojales y hacen contacto cuando se mueven los bigotes. Cleo también tiene dos sensores de posición en la mandíbula, un sensor de inclinación del cuerpo y un sensor de batería de bajo voltaje. El cerebro de Cleo se implementó en un microprocesador Motorola 68HC11E2 que contiene 256 bytes de Memoria de Acceso Aleatorio (RAM) y 2K bytes de memoria de sólo lectura

programable y borrable eléctricamente (EEPROM).

El diagrama arquitectónico de «submption» para los comportamientos de Cleo se puede apreciar en la Figura 18. La red se compone de procesos maquinarios de estado finito (mostrados como cuadros rectangulares) los cuales se envían mensajes mutuamente, o a los sensores o a los actuantes.



La letra S en un círculo representa nodos de supresión, mecanismos de arbitraje entre comportamientos conflictivos, donde comportamientos de alto nivel, una vez activados, pueden subsumir comportamientos de bajo nivel y permitir que la información resultante de los comportamientos de alto nivel sea enviada a los actuantes. El programa modelo en la Figura 18 inicia los 13 procesos indicados, los cuales corren en forma paralela. Dependiendo de la información compilada a través de los foto-reóstatos, bigotes, sensores de alimento y sensores de posición de la mandíbula, diferentes procesos toman control por diversos espacios de tiempo, algunos de éstos subsumiendo otros al ser activados. Cuando Cleo se activa, se percata que no tiene alimento en su mandíbula y comienza su búsqueda de alimento. Se mueve hacia la luz hasta que encuentra alimento, entonces la recoge y se aleja de la luz hasta que topa con una pared, donde bota el alimento, da la vuelta y regresa hacia la luz y repite el proceso. En términos de los procesos computacionales ilustrados en la Figura 18, los motores de transmisión de Cleo son dirigidos a través de comandos generados por el set superior de maquinaria de estado finito o el set inferior, dependiendo del estado de ánimo del robot. El estado de ánimo es determinado por los sensores de alimento. Una vez que los sensores de alimento y de posición de la mandíbula detectan que Cleo está sosteniendo los pellets, el comportamiento **CHG-MD-FD (cambiar de estado de ánimo si hay alimento)** envía una señal al multiplexor para que comience a aceptar comandos del set superior de compor-

tamientos, etiquetados Estado de Animo de Movimiento de Alimento. Un conjunto de acciones similares es activado excepto que **DESDE-LUZ (FROM-LIGHT)** manda a Cleo alejarse de la fuente más brillante de luz y **BOTAR-ALIMENTO (DROP-FOOD)** manda a Cleo botar el alimento cuando topa con una pared. **CHG-MD-NF** entonces se percata que no hay alimento en la mandíbula y envía una señal al multiplexor para que acepte comandos de procesos del Estado de Animo de Encontrar Alimento, y se repite la secuencia. El estilo de «submption» de programación permite la descomposición de complejos comportamientos de un robot en simples procesos lo cual hace posible la reducción del software. Todos los comportamientos ilustrados aquí y las primitivas que controlan los sensores y los motores se pueden implementar en un poco más de 1900 bytes de código, lo cual es bastante pequeño como para caber en el espacio de programación de un microcontrolador de un chip. Con una cubierta ingeniosa, el robot completo cabría en la palma de la mano. El tamaño total del robot terminado se encuentra restringido por el tamaño de los motores DC electromagnéticos de Namiki Corporation que usamos en la actualidad, los cuales son utilizados en beepers como alarmas de vibración. En vista que los motores para beepers se venden sin engranajes, se debe fabricar una caja de engranajes especial para Cleo.

CONCLUSION

Cleo es un ejemplo claro de cómo un robot autónomo extremadamente pequeño puede ser capaz de realizar tareas sofisticadas. Además, Cleo sólo utiliza tecnología convencional, de fácil acceso. Con los avances en la miniaturización de actuantes y sus temas de transmisión, podemos prever el día en que los cirujanos tendrán acceso a muchas y mejores herramientas para los procedimientos que necesitan llevar a cabo. Aunque Cleo y Squirt han sido probados sólo sobre una mesa y están lejos de ser capaces de movilizarse a través de las cavidades del cuerpo humano, los esfuerzos de la ingeniería dirigidos a crear nuevos sistemas de locomoción, ya sean de serpenteo, de anillo o de cuatro patas, etc., pueden tener éxito. Sin embargo, para reducir aún más las miniaturizaciones, será necesario el desarrollo en el área

de los motores. Los motores ultrasónicos, aunque prometedoros, requieren ser aún más desarrollados. No obstante, a medida que avanza la tecnología, parecería que la cirugía del mañana será muy diferente a la actual.