

CAPÍTULO 20

DESARROLLO DE ROBOTS MODULARES DE TIPO SERPIENTE PARA BÚSQUEDA Y RESCATE EN ENTORNOS URBANOS

J GONZÁLEZ-GÓMEZ¹, J. GONZÁLEZ-QUIJANO¹, H. ZHANG² y M. ABDERRAHIM¹

¹Robotics Lab, Universidad Carlos III de Madrid, {juan.gonzalez.gomez, javier.gonzalez-quijano, mohamed.Abderrahim}@uc3m.ing.es; ² TAMS, Department of Informatics, University of Hamburg, Germany, hzhang@informatik.uni-hamburg.de

Los robots modulares de tipo serpiente son buenos candidatos para su uso en operaciones de búsqueda y rescate en entornos urbanos (USAR) por su flexibilidad, adaptabilidad al terreno y su pequeña sección. Proponemos el diseño de robots serpiente que combinen tres habilidades: locomoción, trepar y agarrar. Esta última permite dotarlos de la capacidad para manipular y mover objetos con el fin de despejar el camino hacia las personas atrapadas. El sentido del tacto es un elemento clave para implementar estas habilidades. Proponemos un nuevo enfoque basado en anillos y tiras táctiles.

1 Introducción

Los desastres naturales como terremotos, huracanes, inundaciones o tsunamis causan fuertes destrozos materiales y la pérdida de vidas humanas. Esto último se evita mediante el desalojo previo de las poblaciones si se consigue prever el cataclismo con suficiente antelación. Desafortunadamente esto no es posible en todos los casos por lo que una vez ocurrido la prioridad es encontrar supervivientes rápidamente.

El entorno en las zonas catastróficas urbanas es extremadamente no estructurado y caótico, y está cubierto de escombros por todas partes (Fig. 1). Esto dificulta enormemente las tareas de los equipos de búsqueda y rescate, cuya movilidad se reduce y aumenta el peligro. Además, en los edifi-

cios derrumbados la probabilidad de que haya personas bajo ellos es muy alta por lo que es necesaria su inspección. Bien para rescatar a posibles supervivientes o bien para encontrar las víctimas.



Fig. 1. Escenario urbano típico tras un terremoto. Entorno no estructurado y caótico, con escombros por todas partes. Ciudad de Puerto Príncipe, Haití. Foto cortesía de tumundovirtual.wordpress.com

En las últimas décadas, investigadores de todo el mundo se han enfrentado al problema de diseñar robots teleoperados capaces de moverse en estos entornos y asistir a los equipos de rescate. Las características que se buscan son: flexibilidad, versatilidad y adaptabilidad.

(Yim, 2000) fueron los primeros en sugerir el empleo de robots modulares para este propósito por su versatilidad, robustez y bajo coste. (Miller, 2002) propuso sus robots serpiente reptadores como buenos candidatos. Están formados por módulos en conexión de viraje-viraje (yaw-yaw) con ruedas pasivas, logrando una propulsión similar a la de las serpientes biológicas. (Wolf, 2003), del departamento de mecánica en el CMU desarrollaron un concepto nuevo, basado en la idea de una “trompa de elefante” montada sobre una base móvil. Mediante una cámara situada en el extremo de la trompa se inspeccionaban áreas de difícil acceso como grietas y tuberías.

El gobierno Japonés está especialmente interesado en las aplicaciones de búsqueda y rescate. Está financiando investigaciones para el desarrollo práctico de robots para estos fines. El prof. Hirose y sus colegas del TIT (Tokio Institute of Technology) llevan muchos años trabajando en diversos prototipos (Hirose, 2004). Han diseñado robots con orugas y ruedas tales

como Souryu, Genbu, Kohga, Gunryu y el más reciente Helios VIII (Guarnieri, 2008). También han propuesto a los robots de tipo serpiente por sus potencialmente avanzadas habilidades de movimiento: sus cuerpos pueden actuar como “piernas”, “brazos” o “dedos” dependiendo de la situación. Desde mediados de los años 70 llevan trabajado en la familia de robots ACM (Active Cord Mechanism) (Hirose, 2009). Los prototipos ACM-R3 y R4 tienen ruedas pasivas de diámetro mayor que la altura de los eslabones, recubriendo totalmente el cuerpo del robot. Esto permite que la serpiente pueda deslizarse suavemente sobre los escombros.

En el instituto de Robótica de la universidad de Beihang, (Zhang, 2006) han desarrollado a JL-I. Está compuesto de tres módulos autónomos e idénticos con tres GDL cada uno. Puede superar obstáculos, subir escaleras y recuperar su posición original en caso de volcar.

Uno de los robots más reciente es Amoeba-I (Li, 2009) desarrollado en el Instituto de Automática de Shenyang en China. Está formado por tres módulos con orugas y tiene la capacidad de adoptar nueve configuraciones distintas. Esto permite que pueda cambiar su configuración automáticamente para adaptarse al entorno.

Los robots modulares con topología de una dimensión (1D) se pueden clasificar en dos grupos según el mecanismo empleado para la locomoción: apodos y ápodos auto-propulsados. Los primeros utilizan movimientos corporales similares a sus homólogos biológicos, mientras que los segundos emplean ruedas u orugas activas. Un robot auto-propulsado muy prometedor es Omnithread (Borenstein, 2007) desarrollado en el laboratorio de robótica móvil de la Universidad de Michigan. Es un novedoso diseño formado por cinco segmentos con orugas en todas sus caras para asegurar la propulsión incluso cuando el robot vuelca. (Rimassa, 2009) han desarrollado un robo ápodo auto-propulsado con la habilidad de trepar.

Aunque los robots auto-propulsados son muy prometedores para operaciones USAR, no tienen la flexibilidad de las serpientes reales. Además es difícil acoplarles una piel artificial que recubra todo el robot, debido al uso de ruedas y orugas. Los robots ápodos, en contra, son similares a las serpientes/orugas reales y heredan algunas de sus propiedades. Perambulator (Changlong, 2007) desarrollado en el Instituto de Automática de Shnyang es capaz de combinar una gran propulsión con una alta movilidad. Cada segmento contiene una rueda omni-directional con rodillos locos que permite al robot realizar un movimiento similar al de las serpientes reales.

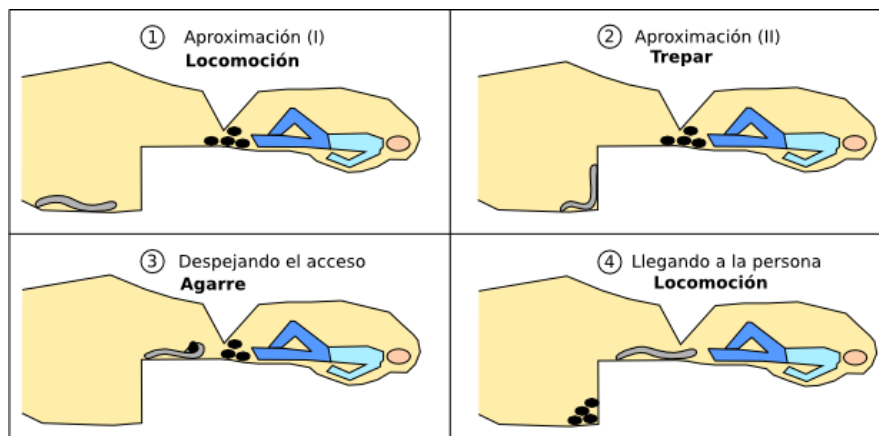


Fig. 2. Escenario general con una persona atrapada, con el acceso bloqueado por escombros. Para que la serpiente llegue hasta la persona tiene que ser capaz de desplazarse, trepar y agarrar objetos

Otro robot modular con altas capacidades locomotivas es Hypercube desarrollado en nuestro grupo (Gonzalez-Gomez, 2006). Puede realizar cinco modos de caminar diferentes: movimiento en línea recta, giros, desplazamiento lateral, rotar y rodar.

Nuestro objetivo es desarrollar un nuevo robot modular de tipo serpiente para aplicaciones de búsqueda y rescate. En este capítulo presentamos las ideas preliminares para su diseño y para dotarlo de las tres habilidades: locomoción, trepar y agarre.

2 Habilidades necesarias

Los robots ápodos modulares tienen un gran potencial para usarse en aplicaciones de búsqueda y rescate. Consideremos el escenario mostrado en (Fig. 1.), donde hay un edificio derrumbado (imagen de Puerto Príncipe, en Haití). Un robot USAR podría adentrarse al interior de la casa y explorarla en busca de personas. Habría dos alternativas para el acceso. Por un lado, el robot podría atravesar los barrotes, si es lo suficientemente pequeño. Por otro lado podría trepar e introducirse por el agujero superior, pero sería necesaria la habilidad para escalar. Los robots serpiente pueden cumplir estos requisitos.

Consideremos ahora un escenario como el mostrado en (Fig. 2) donde una persona está atrapada dentro de una casa y el acceso está bloqueado

por escombros. Vamos a analizar las habilidades requeridas para que el robot pueda llegar hasta el superviviente.

Primero (Fig.2-1) la serpiente robot se aproxima a la zona. Obviamente tiene que ser capaz de desplazarse (habilidad de locomoción). Segundo (Fig.2-2), el robot llega a una pared vertical. Necesita la habilidad de trepar para llegar a la parte superior. Tercero (Fig. 2-3), el camino está bloqueado por escombros. La serpiente puede despejar el acceso agarrando estos objetos y quitándolos de en medio. Necesita la habilidad de agarrar. Finalmente (Fig. 2-4) llega hasta la persona.

Este escenario sugiere que el robot disponga de tres habilidades: locomoción, trepar y agarrar.

2.1 Locomoción

La estructura cinemática de un robot serpiente es similar a la de un brazo robot hiper-redundante, formado por un conjunto de eslabones iguales unidos mediante articulaciones de rotación. Para lograr su locomoción los modelos bio-inspirados están dando mejores resultados que los clásicos basados en un modelado cinemático (directo e inverso).

En la naturaleza, tanto los vertebrados como los invertebrados tienen unas neuronas especializadas, denominadas CPGs (Central Pattern Generator, o generadores centrales de patrones) que oscilan y provocan una actividad rítmica en los músculos, lo que permite al ser vivo realizar actividades como respirar, masticar, movimientos intestinales, locomoción, etc.

Uno de los pioneros en aplicar modelos de CPGs para su aplicación en robótica ha sido Ijspeert, del laboratorio de robótica bio-inspirada del EPFL. En su tesis doctoral (Ijspeert, 1998) 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 el 2004 implementaron el primer prototipo de Amphibot (Crespi, 2004), demostrando la viabilidad de su modelo bio-inspirado para la locomoción de robots.

El modelo que estamos empleando para la locomoción de los robots serpiente es el propuesto por (González-Gómez, 2008) basado en osciladores sinusoidales (Fig. 3). Cada módulo tiene un oscilador asociado que hace variar su ángulo de salida según la ecuación (1),

$$\varphi_i(t) = A_i \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \Delta\Phi_i + \Phi_0\right) + O_i \quad (1)$$

donde T es el periodo (el mismo para todos los módulos), A_i la amplitud del módulo i , $\Delta\Phi_i$ la diferencia de fase con el módulo anterior, Φ_0 la fase inicial (misma para todos) y O_i el desplazamiento.

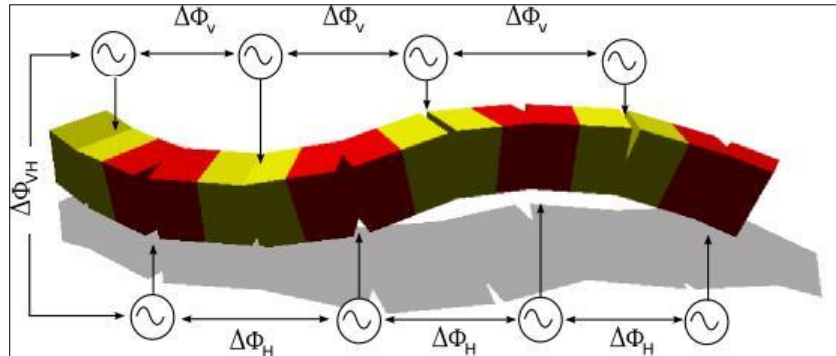


Fig. 3. Modelo de locomoción basado en osciladores sinusoidales

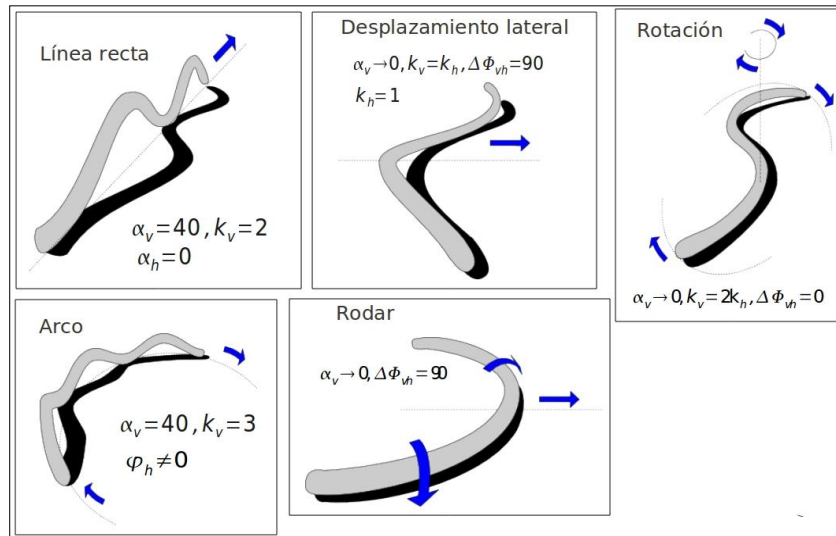


Fig. 4. Modos de caminar implementados en el robot serpiente, usando el modelo de osciladores sinusoidales

Este modelo bio-inspirado simplificado requiere de muy pocos recursos para su implementación, pudiéndose emplear microcontroladores baratos de gama baja (8 bits). Además, es lo suficientemente potente para permitir

realizar al menos cinco modos de caminar diferentes (Fig. 4): línea recta, giros, desplazamiento lateral, rotación y rodar en robots modulares con cualquier número de módulos superior a 2.

2.2 Tregar

Los modos de tregar en los seres vivos con topología 1D (serpientes, gusanos y orugas) se pueden clasificar en dos tipos: los que usan el cuerpo y los que disponen de elementos de adhesión específicos.

Entre los primeros se encuentran las serpientes. Usan su cuerpo para enroscarse alrededor de los troncos de los árboles y escalarlos. Este modo de tregar ha sido estudiado por (Ross, 2010) e implementado en la serpiente CmuSnake (Fig. 5-1).

El segundo tipo de modo de tregar se basa en el empleo de elementos especializados para realizar la adhesión. Es similar al que utilizan las diferentes familias de orugas (Fig. 5-2 y Fig. 5-3). Este movimiento de tregar es similar al de desplazarse en línea recta por una superficie horizontal, pero al utilizar los elementos de sujeción el animal puede ejecutarlo también sobre superficies verticales.

Existen cuatro principios para los elementos de adhesión, utilizados en diferentes robots trepadores: electromagnético, fuerza mecánica, fuerza molecular y vacío. Los electromagnéticos sólo son viables si la superficie a tregar es metálica. Los de fuerza mecánica se basan en usar elementos mecánicos para generar el agarre suficiente como por ejemplo pinzas. Su uso en robot serpientes se descarta por la complejidad mecánica que supone añadir esos elementos. Los de fuerza molecular son muy prometedores. Se basan en el principio empleado por las lagartijas que les permite subir por superficies verticales de casi cualquier material, así como moverse también por los techos (Sitti, 2003). Sin embargo es un material que todavía no está disponible comercialmente.

El cuarto principio, basado en vacío, permite también conseguir muy buenos resultados. En trabajos previos (Zhang, 2009) hemos propuesto un nuevo principio basado en ventosas pasivas vibrantes. Al presionar una ventosa contra una superficie el aire interior se expulsa, disminuyendo la presión y aumentando el agarre. Si en este momento se tira levemente de la ventosa, el volumen aumenta y la presión disminuye, aumentando todavía más el agarre. Al cabo de un tiempo empieza a entrar aire con lo que el agarre disminuye, pero si se vuelve a presionar aumentará de nuevo. Repitiendo el ciclo apretar-tirar se consigue un agarre estable y permanente.

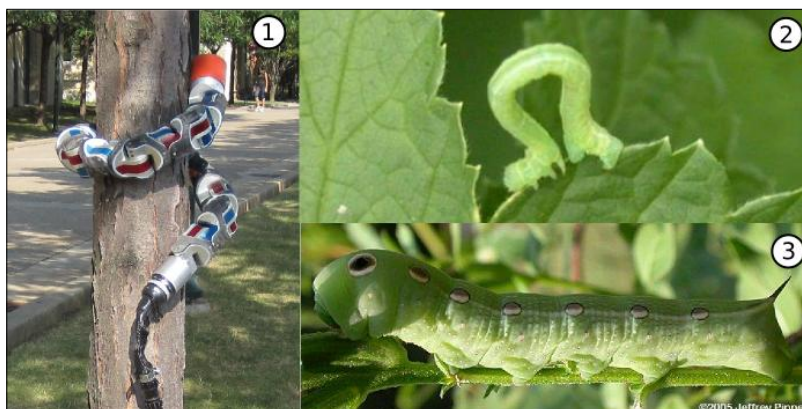


Fig. 5. Modos de trepar para sistemas con topología 1D. 1) Robot serpiente CMU-Snake: usando el cuerpo. 2) y 3) Dos tipos de oruga: usan elementos de adhesión

Mediante estas vibraciones de baja frecuencia en las que se empuja y tira de la ventosa se consigue que el agarre sea estable. Para dotar al robot serpiente de la habilidad de trepar proponemos usar este principio, colocando ventosas pasivas en la panza del robot.

2.3 Agarre

La habilidad de agarrar objetos con el cuerpo es muy interesante para aplicaciones de búsqueda y rescate, ya que permite que el robot pueda manipular los objetos del entorno y no sólo desplazarse sobre él.

En trabajos previos hemos estudiado y simulado diferentes modos de agarre en serpientes modulares robóticas (Salviati, 2009). Algunos se muestran en la (Fig. 6). Existen dos clases de modos de agarrar: el envolvente y el puntual. En los primeros, la serpiente “envuelve” el objeto que quiere agarrar o manipular. Puede hacerlo bien con la parte frontal (agarre con la cabeza, Fig. 6-1), con la parte trasera (agarre con la cola, Fig. 6-2) o bien con la parte central (agarre con el cuerpo, Fig. 6-3). En los segundos, la serpiente contacta con el objeto en puntos discretos. En el ejemplo de la Fig. 6-4 el agarre es con dos puntos. Esto permite una manipulación más fina, por ejemplo para cambiar la orientación del objeto o desplazarlo ligeramente.

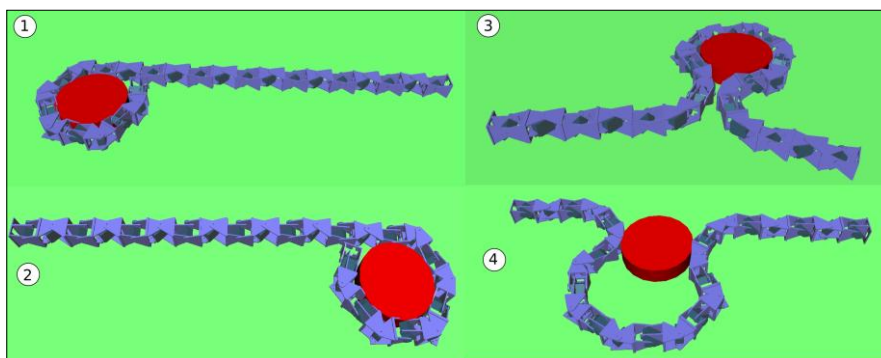


Fig. 6. Modos de agarre en serpientes robóticas modulares. 1) Agarre con la cabeza. 2) Agarre con la cola. 3) Agarre con el cuerpo, 4) Agarre en dos puntos

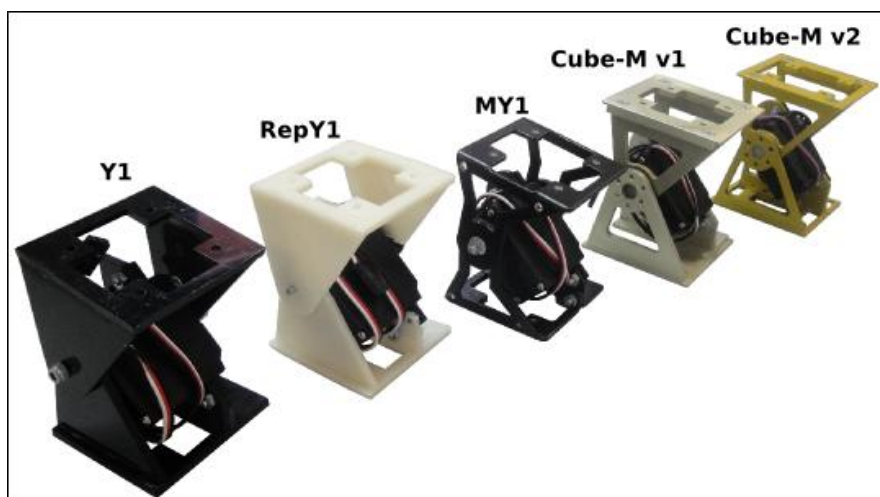


Fig. 7. Familia de módulos diseñados para construir robots modulares de tipo serpiente

3 Mecánica y sensores

3.1 Módulos

Para la construcción de robots modulares de tipo serpiente hemos creado cinco módulos, divididos en dos familias: Y1 y Cube-M (Fig-7). La fami-

lia Y1 es muy barata y fácil de construir. Se diseñó pensando en el prototipado rápido y propósitos educativos. Los módulos tienen un grado de libertad actuado por un servo de tipo Futaba 3003. La electrónica incorpora un microprocesador PIC16F876A de 8 bits. La familia está compuesta por tres módulos: Y1 (2003), RepY1 (2009) y MY1 (2010). Los módulos Y1 constan de 6 piezas de plástico que se pegan. Están pensados para usos educacionales. Los estudiantes los pueden construir fácilmente y con poco dinero. Los RepY1 son la versión “imprimible” en 3D, usando bien impresoras 3D comerciales u Opensource de bajo coste como las de la familia Reprap¹. La versión MY1 está hecha en aluminio. Se compone de tres piezas unidas mediante tornillos y tuercas de 3mm.

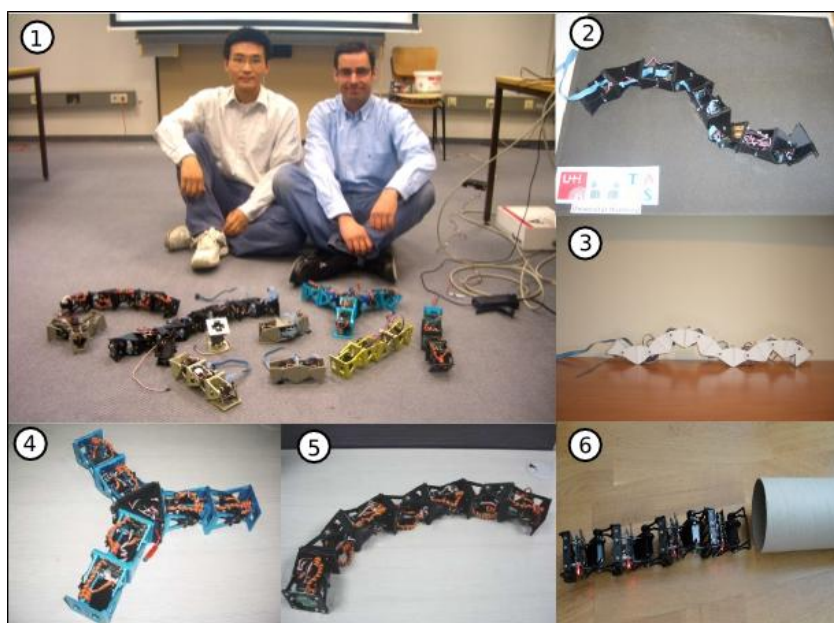


Fig. 8. Algunos de los prototipos de robots modulares. 1) Dr. Zhang y Dr. González-Gómez junto a algunos de los prototipos. 2) Robot Hypercube: 8 módulos Y1 en conexión cabeceo-viraje. 3) Robot Cube Revolutions: Oruga con 8 módulos Y1 con conexión de cabeceo-cabeceo. 4) Robot de Topología 2D en forma de estrella. 5) Serpiente de 7 módulos Cube-M. 6) Oruga de 4 módulos MY1 atravesando un tubo

La familia Cube-M (Zhang, 2009) es una mejora sobre los Y1. Están hechos en aluminio y pueden soportar mayores cargas, lo que permite

¹ http://reprap.org/wiki/Main_Page

construir robots modulares más grandes y pesados. La electrónica también se ha mejorado y se ha insertado dentro de los módulos.

3.2 Prototipos de robots

Algunos de los prototipos de robots modulares desarrollados se muestran en la Fig. 8. Nos hemos centrado principalmente en el estudio de la locomoción de robots modulares con topología de 1D. Este grupo se puede dividir en dos subgrupos: conexión de cabeceo-cabeceo y cabeceo-viraje. En los primeros todos los módulos tienen la misma orientación y se mueven perpendicularmente al suelo (Fig. 6-3 y 6-6). Estas configuraciones son cinemáticamente iguales que las de las orugas reales. Por ello, estos robots, aunque sólo pueden desplazarse en línea recta, son muy útiles para estudiar las habilidades trepadoras.

El segundo grupo lo forman robots donde los módulos se mueven paralelamente al suelo (yaw) y perpendicularmente a él (pitch). Estas configuraciones se pueden mover en 2D (Fig. 6-2, 6-5).

También se han desarrollado robots con topologías 2D, como el robot estrella de la Fig. 6-4 y se han estudiado los algoritmos para su locomoción. Sin embargo, su uso para búsqueda y rescate se deja para trabajos futuros.

3.3 Sentido del tacto

Para la implementación de las tres habilidades: locomoción, trepar y agarre es de vital importancia, especialmente para el agarre, dotar al robot del sentido del tacto.

Para lograrlo, hemos propuesto la idea de anillos táctiles (González-Gómez, 2010). En vez de utilizar una piel artificial que recubre el robot, lo cual es un gran reto, proponemos usar anillos táctiles situados a distancias d fijas (Fig. 9). El sentido del tacto, por tanto, no es continuo sino discreto. Pero si se quiere aumentar la resolución sólo habría que añadir más anillos, disminuyendo la distancia d .

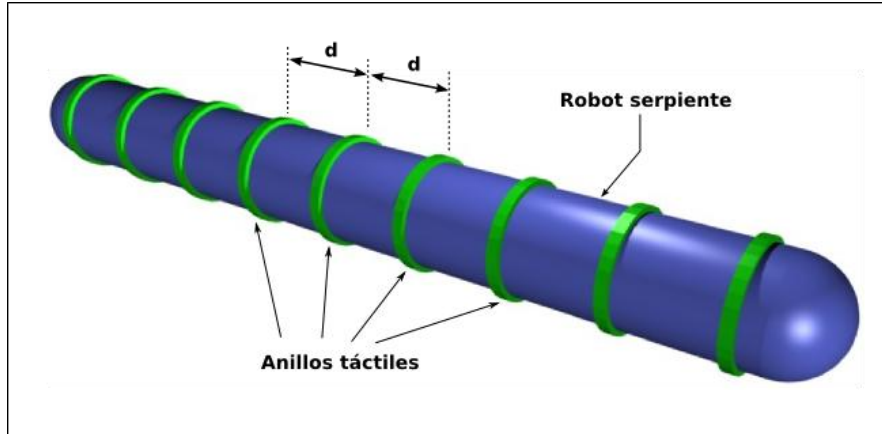


Fig. 9. Uso de anillos táctiles para implementar el sentido del tacto en robots modulares de tipo serpiente

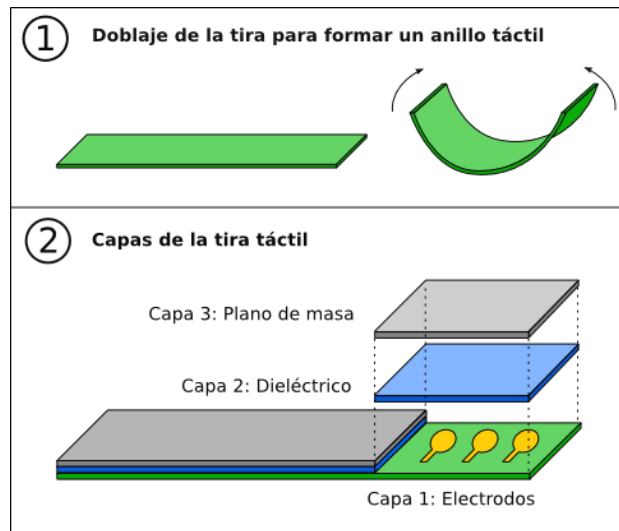


Fig. 10. Tiras y anillos táctiles. 1) la tira es flexible, y se dobla para formar los anillos táctiles que se colocan alrededor de la sección del robot. 2) Composición de la tira táctil

Estos anillos táctiles están formados por una tira capacitiva flexible que se dobla (Fig. 10).

Una ventaja de este diseño es su flexibilidad, pudiéndose adaptar a serpientes con distintas secciones. En el ejemplo de la Fig. 9, la sección es circular, pero también es válidos para secciones cuadradas, que sería el caso de los módulos Y1 y Cube-M. Este diseño es por tanto muy versátil y válido para muchos tipos de serpientes. Además, la longitud de la tira se puede cambiar para ajustar a las necesidades de la aplicación. Cuanto más larga, mayor cantidad de sensores capacitivos se pueden colocar.

La tira está formada por tres capas (Fig. 10-2). La primera es un PCB flexible con los electrodos. La segunda es un dieléctrico flexible, como por ejemplo silicona (S60) o poliéster (PEPT). La tercera es el plano de masa.

Cuando se aplican fuerzas normales el dieléctrico se comprime y la distancia entre los electrodos y el plano de masa disminuye, por lo que la capacidad cambia.



Fig. 11. Experimentos de locomoción. 1) Locomoción en exteriores de un robot de 12 módulos MY1. 2) Superposición de imágenes del desplazamiento lateral de un robot con conexión cabeceo-viraje de 8 módulos. 3) Mismo robot realizando una rotación en sentido anti-horario

4 Experimentos

4.1 Locomoción

Para validar el modelo de osciladores sinusoidales se han realizado experimentos de locomoción tanto en simulaciones como en robots reales (Fig. 11). Para el robot Hypercube de 8 módulos Y1 con conexión cabeceo-viraje se ha comprobado que puede realizar correctamente los 5 modos de caminar descritos en el apartado 3.1. En la Fig. 11-2 se muestran imágenes superpuestas del movimiento de desplazamiento lateral y en la Fig. 11-3 del movimiento de rotación.

También se han realizado experimentos de locomoción autónoma en exteriores usándose una configuración de 12 módulos MY1 con conexión cabeceo-cabeceo (Fig. 11-1).

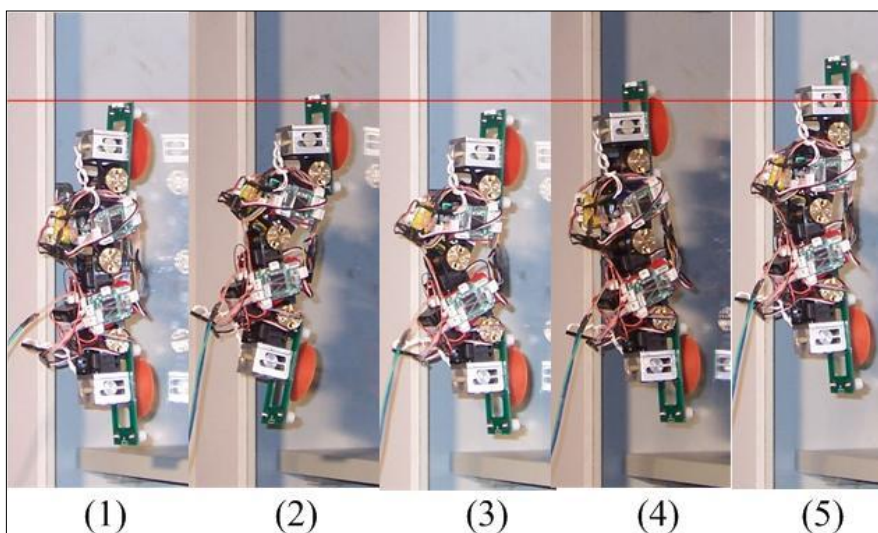


Fig. 12. Experimentos de trepar en una oruga con conexión cabeceo-cabeceo de tres módulos

4.2 Trepar

Para validar el principio de adhesión mediante ventosas pasivas vibrantes se ha empleado una configuración de 3 módulos diseñados a medida a los que se les han adaptado en la panza las ventosas.

Las pruebas se han realizado sobre una superficie de cristal. Inicialmente (Fig. 12-1) las dos ventosas están adheridas y en constante vibración para hacer estable el agarre. En Fig. 12-2 la ventosa inferior se despega y en Fig. 12-3 el robot se contrae y las dos ventosas vuelven a estar en contacto. A continuación se repite el proceso con la ventosa superior y finalmente el ciclo vuelve a repetirse.

El tiempo empleado para cada paso es de 1.8s y la longitud que avanza en cada paso es de 5 mm.

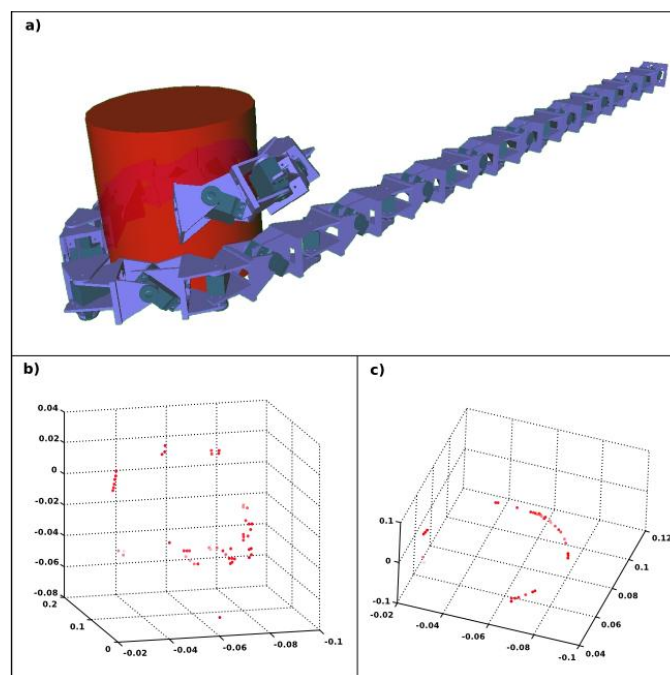


Fig. 13. Simulaciones del agarre de un objeto cilíndrico. a) El robot serpiente realizando el agarre. b) y c) Nube de puntos con las fuerzas de contacto. En c) se ha cambiado la orientación para poderse apreciar el contorno del cilindro

4.3 Agarre

El agarre con robots serpientes está en un estado preliminar y sólo se han realizado simulaciones. Se ha utilizado el software OpenRave (Diankov,

2008) sobre el que se han programado extensiones para incorporar la simulación de robots modulares (OpenMR²).

En la Fig. 13 se muestra un simulación de un robot serpiente del grupo cabeceo-*viraje* de 30 módulos Y1 que está agarrando un cilindro. En Fig. 13-1 se muestra un pantallazo en OpenRave. En Fig. 13-2 se visualizan las nubes de puntos resultantes de las fuerzas normales entre el robot y el objeto. En 13-3 se ha cambiado la orientación de esta nube para apreciarse el contorno del cilindro.

6 Conclusiones

Los robots modulares de tipo serpiente son buenos candidatos para las operaciones de búsqueda y rescate en entornos urbanos. Proponemos dotarlos de tres habilidades: locomoción, trepar y agarre. La locomoción mediante osciladores sinusoidales requiere muy pocos recursos para su implementación y permite conseguir al menos cinco tipos de modos de caminar. Además, los movimientos resultantes son muy suaves y naturales. Para trepar proponemos usar el novedoso principio de ventosas pasivas vibrantes, que está dando buenos resultados y su implementación es muy barata. El agarre permite al robot retirar obstáculos del camino. Para su realización hay que dotar al robot del sentido del tacto. Nuestro novedoso enfoque es usar anillos capacitivos flexibles y táctiles, que pueden adaptarse a cualquier robot serpiente y se puede aumentar su resolución aumentando su número.

Todavía queda un largo recorrido hasta tener un prototipo totalmente funcional. Los problemas pendientes de abordar son: integrar en el modelo de locomoción el sentido del tacto, para que la serpiente adopte la forma del terreno a medida que se desplaza por él, movimientos en 2D sobre superficies verticales e implementación del agarre en los prototipos.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado parcialmente por el proyecto HANDLE, dentro del séptimo programa de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013) en virtud del acuerdo de subvención ICT 231640.

² OpenMR: <http://goo.gl/33Hr0>

Referencias

Borenstein, J., Hansen, M., Borrell, A. 2007. The OmniTread OT-4 serpentine robot-design and performance. *Journal of Field Robotics*, vol. 24, pp. 601–621.

Changlong, Y., Shugen, M., Bin, L., Hongjun, L., Hequan, W. 2007. Development of a 3D Snake-like Robot: Perambulator-II. In *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, (Harbin, China), pp. 117–122.

Crespi, A., Badertscher, A., Guignard, A., Ijspeert, A.J. 2004. An amphibious robot capable of snake and lamprey-like locomotion. In *Proc. 35th international symposium on robotics*.

Diankov, R., Kuffner, J. 2008. OpenRAVE: A Planning Architecture for Autonomous Robotics. *Tech. Rep. CMU-RI-TR-08-34*, Robotics Institute.

González-Gómez, J., Zhang, H., Boemo, E. 2006. Locomotion capabilities of a modular robot with eight pitch-yaw-connecting modules. In *Proc. of the Int. Conf. on climbing and Walking machines*, pp. 150–157.

González-Gómez, J. 2008. *Robótica modular y locomoción: aplicación a robots ápodos*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.

González-Gómez, J., Zhang, H., Abderrahim, M. 2010. Toward the sense of touch in snake modular robots for search and rescue operations. In *Proc. of the ICRA 2010 workshop on modular robots: State of the art*. May-3rd, Anchorage, Alaska, pp. 63-68.

Guarnieri, M., Takao, I., Fukushima E. F., Hirose, S. 2008. HELIOS VIII: Toward Practical Robots for Search and Rescue Operations. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 20(5): 675–694.

Hirose, S., Fukushima, E.F. 2004. Snakes and Strings: New Robotic Components for Rescue Operations. *The International Journal of Robotics Research*, 23(4-5):341-349.

Hirose, S., Yamada, H. 2009. Snake-Like Robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 16(1): 88-98.

Ijspeert, A. J. 1998. Design of artificial neural oscillatory circuits for the control of lamprey and salamander-like locomotion using evolutionary algorithms. PhD thesis, University of Edimburg.

Li, B., Ma, S., Liu, J., Wang, M., Liu, T., Wang, Y. 2009. AMOEBA-I: A Shape-Shifting Modular Robot for Urban Search and Rescue. *Advanced Robotics*, 23(9): 1057-1083.

Miller, P. G. 2002. Snake Robots for Search and Rescue. In *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, MIT Press, pp. 271–284.

Rimassa, L., Zoppi, M., Molfino, R. 2009. A modular serpentine rescue robot with climbing ability. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(4): 370-376.

Ross H., Choset, H. 2010. Generating gaits for snake robots: annealed chain fitting and keyframe wave extraction. *Autonomous Robots*, 28(3): 271-281.

Salvietti, G., Zhang, H.X., Gonzalez-Gomez, J., Prattichizzo, D., Zhang, J. W. 2009. Task priority grasping and locomotion control of modular robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 1069-1074.

Sitti, M., Fearing, R. 2003. Synthetic gecko foot-robots. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1164-1110.

Wolf, A., Brown, h., Casciola, R., Costa, A., Schwerin, M., Shamas E., Choset, H. 2003. A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2889–2895

Yim, M., Duff, D., Roufas, K. 2000. Modular reconfigurable robots, an approach to urban search and rescue. In *1st Intl. Workshop on Human friendly Welfare Robotics Systems*, pp. 69–76.

Zhang, H., Gonzalez-Gomez, J., Chen, S., Zhang, J. 2009. Embedded Intelligent Capability of a Modular Robotic System. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and biomimetics*, (Bangkok, Thailand), pp. 2061–2066.

Zhang, H., Wang, W., Gonzalez-Gomez, J., Zhang, J. 2009. Design and Realization of a Novel Modular Climbing Caterpillar Using Low-Frequency Vibrating Passive Suckers. *Advanced Robotics*, 23(7): 889-906.

Zhang, H., Wang, W., Deng, Z. 2006. A Novel Reconfigurable Robot for Urban Search and Rescue. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 3(4): 359-366.

