

CAPÍTULO 19

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE PATRONES DE MOVIMIENTO PARA UN ROBOT TIPO GUSANO

M. GARZON OVIEDO, A. BARRIENTOS, J. DEL CERRO, C. ROSSI

Centro de Automática y Robótica UPM-CSIC

Este trabajo estudia el sistema de locomoción de la lombriz de tierra. Se realiza un análisis cinemático del movimiento peristáltico y se evalúan diversas secuencias de movimiento de cara a la aplicación de las mismas en un robot gusano que será construido tratando de emular las características motrices de este animal.

1 Introducción

La miniaturización de los robots precisa, no sólo de reducir el tamaño de los mismos, sino que también es necesario desarrollar nuevos métodos de locomoción que sean sencillos, escalables y robustos. Tomando como inspiración el movimiento de los animales, se encuentra que en el caso de las lombrices de tierra el movimiento peristáltico requiere un espacio más reducido que el de los robots artrópodos. Esto permite construir robots de tamaño muy pequeño, capaces de moverse en regiones muy confinadas además la locomoción por movimientos peristálticos permite el desplazamiento no solamente sobre una superficie plana, sino también en otras más complicadas como el interior de tubos o incluso bajo la tierra.

Trasladar estos modelos de locomoción bioinspirados a los robots ha permitido construir sistemas de tamaño muy pequeño, que pueden ser controlados de manera sencilla, estando actualmente en uso experimental en áreas como la robótica médica, en la que se han propuesto y evaluado robots con locomoción peristáltica en endoscopias y colonoscopias está siendo estudiado ampliamente (Kassim *et al.*, 2006).

2 Locomoción en las Lombrices de Tierra

La locomoción en la mayoría de los animales artrópodos y vertebrados está basada principalmente en cambios de los ángulos de las articulaciones que unen segmentos rígidos de su cuerpo. Los organismos con cuerpos blandos o hidrostáticos, como la lombriz de tierra, se mueven en base a cambios en la forma y dimensiones de los segmentos de su cuerpo, los mecanismos de locomoción que permite a la lombriz de tierra desplazarse han sido ampliamente estudiados por biólogos. (Gray & Lissmann, 1938)

2.1 Anatomía de la Lombriz de Tierra

El cuerpo de la lombriz está compuesto por varios segmentos similares entre sí, cada segmento es una cavidad llena de un fluido, y está rodeado por dos grupos de músculos: circulares y longitudinales. Las dos capas de músculos son antagónicas entre sí, esto es, cuando los músculos longitudinales se contraen los circulares se relajan por tanto el segmento aumenta su diámetro y disminuye su longitud, de la misma manera cuando los músculos circulares se contraen los longitudinales se relajan haciendo que el segmento incremente su longitud pero disminuya su diámetro. Esta compensación permite que el volumen de cada segmento se mantenga constante en todo momento. La lombriz de tierra puede estirar longitudinalmente cada uno de sus segmentos aproximadamente 60%, y su contracción circular puede alcanzar el 25%, estas proporciones se mantienen con pocas variaciones independientemente del tamaño de la lombriz (Quillin, 1999).



Fig. 1. Lombriz de tierra

2.2 Movimiento Peristáltico de la Lombriz de Tierra

Mediante cambios coordinados en la forma de los segmentos se genera un movimiento ondulatorio en el cuerpo del animal, conocido como movimiento peristáltico.

En el caso de la lombriz de tierra, el movimiento peristáltico se realiza en sentido contrario al avance del animal, es decir las ondas en el cuerpo de la lombriz se desplazan hacia atrás permitiendo que esta se desplace hacia adelante. Mientras la lombriz está en posición de descanso, sus músculos longitudinales y circulares están parcialmente relajados, a partir de esta posición el movimiento peristáltico se genera siguiendo esta secuencia:

1. Contracción de los músculos circulares de los segmentos anteriores.
2. La contracción de músculos circulares se propaga hacia los segmentos posteriores.
3. Cuando la onda de contracciones de músculos circulares pasa la mitad del cuerpo, los músculos circulares de la parte anterior se relajan.
4. Contracción de los músculos longitudinales de los segmentos anteriores.
5. La contracción de los músculos longitudinales se propaga hacia las secciones posteriores.
6. Cuando se contraen los músculos longitudinales de los segmentos posteriores, los músculos circulares de las secciones anteriores se contraen nuevamente haciendo que estas secciones se muevan hacia adelante.

2.3 Cinemática del movimiento de la Lombriz de Tierra

La cinemática de los animales con hidroesqueletos, pueden ser descritas por las mismas variables que describen la cinemática de los movimientos de animales con patas, un ciclo peristáltico completo es equivalente a una zancada, o el ciclo completo de una pierna, dos pasos en el caso del ser humano.

El largo de la zancada se define como la distancia avanzada durante un ciclo peristáltico. El periodo de la zancada es el tiempo que tarda el animal en completar un ciclo peristáltico y está dividido en dos partes: el tiempo de progresión en el que los segmentos están avanzando sobre el sustrato, y el tiempo de estancia en el que los segmentos se están sujetando al sustrato. Estas tres variables independientes permiten conocer todas las

demás variables cinemáticas del movimiento de gusano como velocidad de movimiento, frecuencia de la zancada, etc. (Quillin, 1999).

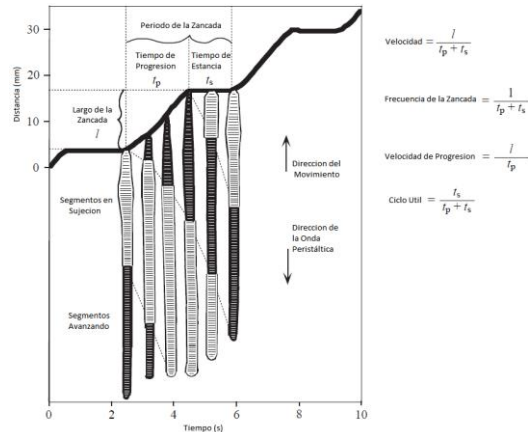


Fig. 2. Cinemática del movimiento de la lombriz

La lombriz de tierra se mueve hacia adelante a una velocidad igual al largo de una zancada, multiplicado por la frecuencia de la misma, para la velocidad de progresión solamente se toma en cuenta el tiempo en el que los segmentos se están expandiendo longitudinalmente, el ciclo útil marca la relación entre el tiempo de estancia y el tiempo total de la zancada.

3 Aplicación del modelo a un robot gusano

Utilizando como base los estudios realizados por diferentes investigadores con un enfoque biológico, se ha propuesto un modelo del robot utilizando una herramienta de simulación, el modelo de locomoción para un robot gusano, evaluando su eficiencia mediante simulación.

En una primera fase, con el objetivo de validar el modo de locomoción se ha simulado un robot gusano de 4 cuerpos o anillos que pueden ser actuados de manera independiente. Cada uno de estos cuerpos simula un segmento de una lombriz de tierra, es decir, un cuerpo cilíndrico de volumen constante que puede contraerse o expandirse longitudinalmente o circularmente, además en el momento de expansión circular, el rozamiento entre el segmento y la superficie se incrementa, de esta manera se simula la sujeción al sustrato que la lombriz de tierra logra utilizando filamentos retractiles.

Utilizar un robot de solamente 4 cuerpos permite conocer todas las posibles formas que puede lograr el robot durante su marcha, es decir todas las combinaciones entre contracción y expansión que pueden obtenerse.

De este modo, y debido a que un segmento puede estar en solamente 2 estados finales (contraído o expandido circularmente al máximo), es posible obtener 16 formas diferentes del cuerpo, la siguiente figura muestra las 16 posibles formas del robot.

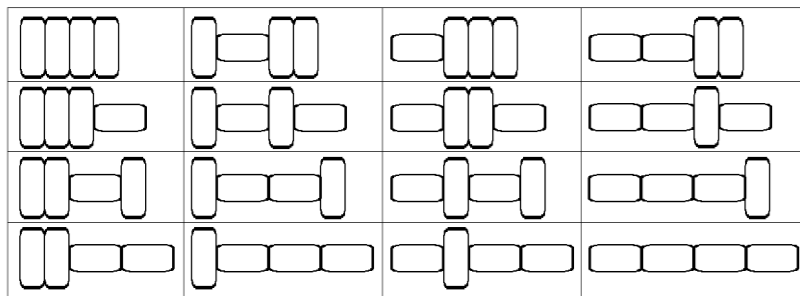


Fig. 3. Posibles estados del robot

3.1 Diferentes patrones de movimiento

Tomando diferentes combinaciones de estas posiciones podemos obtener patrones de marcha distintos, es decir diferentes combinaciones que permitan obtener un movimiento del robot, Ha sido un objetivo de este estudio valorar estos patrones alternativos de marcha, es decir, basándose en condiciones constantes del terreno evaluar que combinación de movimientos permite tener un desplazamiento más eficiente o más sencillo de implementar.

En este estudio se han comparado tres patrones diferentes, el primero está basado en la descripción del movimiento peristáltico de la lombriz de tierra que se refirió antes, es decir, se inicia contrayendo circularmente los sectores anteriores y se traslada la onda hacia atrás, al pasar la mitad del cuerpo se inicia la contracción longitudinal, la Fig. 3 muestra la secuencia.

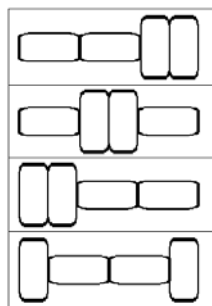


Fig. 4. Secuencia de movimiento 1

El segundo patrón de movimientos, es más sencillo que el anterior, en este caso solamente un cuerpo cambia de estado en cada caso, se transmite por tanto una onda peristáltica de un solo segmento, la secuencia presenta en la Fig. 4.

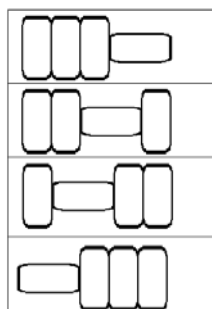


Fig. 5. Secuencia de movimientos 2

El tercer patrón de movimiento que se ha considerado es una expansión completa del robot, seguida por una contracción. Esta secuencia consta de ocho pasos y se muestra en la Fig. 5.

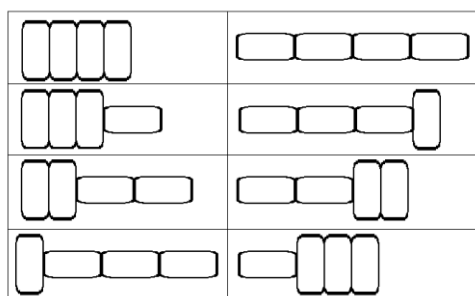


Fig. 6. Secuencia de movimientos 3

3.2 Aplicación de los patrones en un entorno simulado.

Estas secuencias se han programado y analizado utilizando el software de simulación Webots™ (Michel, 2004). A partir de los resultados obtenidos, se ha realizado el análisis cinemático, buscando para cada uno las variables independientes: Tiempo de Progresión, Tiempo de Estancia, Largo de la Zancada.

A partir de estas variables independientes se han obtenido el resto de las variables cinemáticas: Velocidad, Frecuencia de la Zancada, Ciclo Útil y Velocidad de Progresión. Adicionalmente se cuantificará también la relación entre la progresión y el retroceso que puede presentarse en algunas de las secuencias de movimiento.

Para el primer patrón de movimiento se obtiene el siguiente resultado:

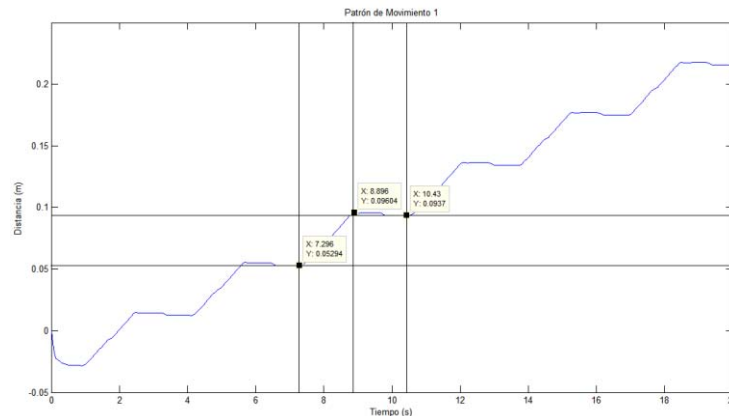


Fig. 7. Resultados del patrón de movimientos 1

Directamente de la gráfica se puede encontrar las tres variables cinemáticas independientes, tiempo de progresión T_p , tiempo de estancia T_s y largo de la zancada l

$$T_p = 8.896s - 7.296s \quad T_p = 1.6s \quad (1)$$

$$T_s = 10.43s - 8.896s \quad T_s = 1.534s \quad (2)$$

$$l = 0.0936m - 0.05294m \quad l = 40.76mm \quad (3)$$

La velocidad del robot se puede obtener utilizando la ecuación mencionada antes, y utilizando los valores encontrados en (1), (2) y (3).

$$V = \frac{l}{T_p + T_s} \tag{4}$$

$$V = \frac{40.76m}{1.6s + 1.534s} \quad V = 13 \text{ mm/s}$$

La frecuencia de la zancada también se puede obtener a partir de (1) y (2).

$$f_z = \frac{1}{T_p + T_s} \tag{5}$$

$$f_z = \frac{1}{1.6s + 1.534s} \quad f_z = 0.319s^{-1}$$

La velocidad de Progresión:

$$V_p = \frac{l}{T_p} \tag{6}$$

$$V_p = \frac{40.76mm}{1.6s} \quad V_p = 25.47 \text{ m/s}$$

Finalmente el ciclo útil:

$$DC = \frac{T_s}{T_p + T_s} \tag{7}$$

$$DC = \frac{1.534s}{1.6s + 1.534s} \quad DC = 0.489$$

Para el segundo patrón de movimiento los resultados obtenidos han sido los siguientes:

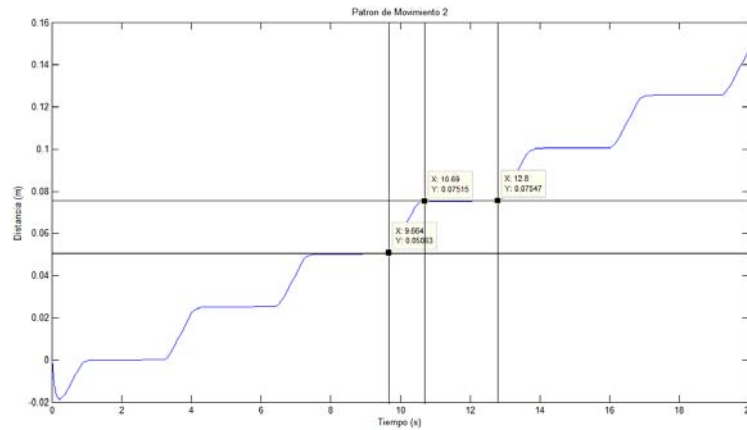


Fig. 8. Resultados del patrón de movimientos 2

Nuevamente a partir de la gráfica es posible obtener las variables cinemáticas independientes.

$$T_p = 10.69s - 9.664s \quad T_p = 1.026s \quad (8)$$

$$T_s = 12.8s - 10.69s \quad T_s = 2.11s \quad (9)$$

$$l = 0.07547m - 0.05063m \quad l = 24.84mm \quad (10)$$

La velocidad obtenida con este patrón de movimientos es posible encontrarla nuevamente, aplicando los valores de (8), (9) y (10) en la ecuación (4).

$$V = \frac{24.84m}{1.026s + 2.11s} \quad V = 7.92 \text{ mm/s}$$

Frecuencia de la zancada aplicando (8) y (9) en (5):

$$f_z = \frac{1}{1.026s + 2.11s} \quad f_z = 0.318s^{-1}$$

Velocidad de Progresión aplicando (8) y (10) en (6):

$$V_p = \frac{24.84mm}{1.026s} \quad V_p = 24.21 \text{ mm/s}$$

Ciclo Útil aplicando (8) y (9) en (7):

$$DC = \frac{2.11}{1.026s + 2.11s} \quad DC = 0.673$$

Para el tercer patrón de movimiento se obtienen los siguientes resultados,

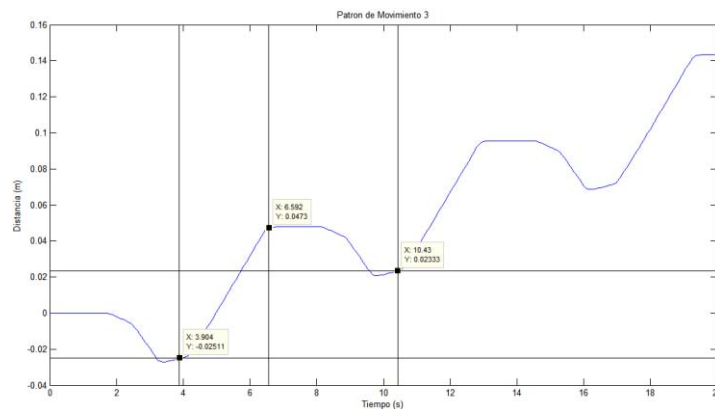


Fig. 9. Resultados del patrón de movimientos 3

Al igual que en los casos anteriores a partir de la gráfica se obtienen las variables independientes.

$$T_p = 6.592s - 3.904s \quad T_p = 2.688s \quad (11)$$

$$T_s = 10.43s - 6.592s \quad T_s = 3.838s \quad (12)$$

$$l = 0.02333m - (-0.02511m) \quad l = 48.41mm \quad (13)$$

Se encuentra la velocidad del robot para este caso nuevamente reemplazando (11), (12) y (13) en (4).

$$V = \frac{48.44mm}{2.688s + 3.838s} \quad V = 7.42 \text{ mm/s}$$

Frecuencia de la zancada aplicando (11) y (12) en (5):

$$f_z = \frac{1}{2.688s + 3.838s} \quad f_z = 0.153s^{-1}$$

Velocidad de Progresión aplicando (11) y (13) en (6):

$$V_p = \frac{l}{T_p} = \frac{48.41mm}{2.688s} \quad V_p = 18.01 \text{ mm/s}$$

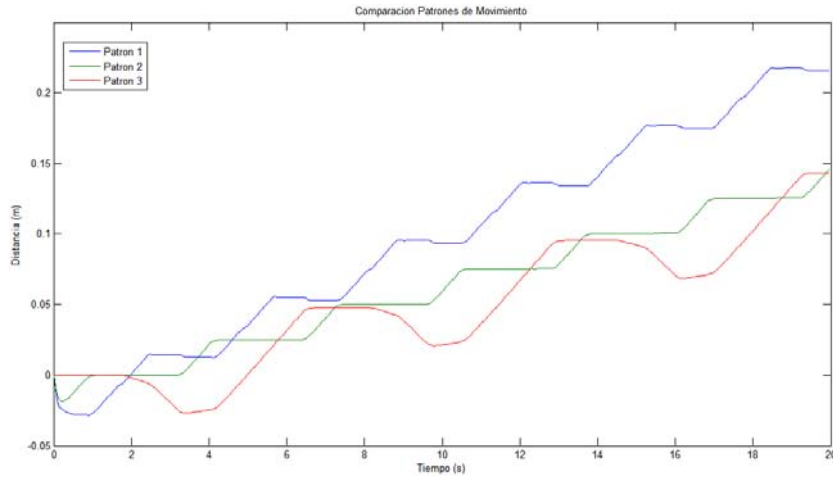


Fig. 10. Comparación de los patrones de movimiento

Ciclo Útil aplicando (11) y (12) en (7):

$$DC = \frac{3.838s}{2.688s + 3.838s} \quad DC = 0.588$$

Para una comparación más clara de los resultados, la Fig. 10 compara los resultados obtenidos con los tres patrones de movimiento.

3.3 Aplicación a robots gusano con mayor número de cuerpos

El análisis en el caso de un robot de este tipo con un número de segmentos mucho mayor requiere un enfoque diferente, pues la metodología utilizada para 4 cuerpos se torna inviable para un número elevado debido a que el número de combinaciones que definen la secuencia de marcha crece exponencialmente a medida que se aumenta la cantidad de cuerpos.

Un posible enfoque alternativo, consistiría en dividir el robot de un alto número de cuerpos en varios robots de menos cuerpos, y aplicar estas secuencias de movimiento a cada división del robot. Esta solución aún siendo susceptible de proporcionar una información orientativa, no garantiza el poder proporcionar toda la información necesaria para un estudio exhaustivo y preciso de la eficiencia de la locomoción.

Por ello, se ha optado por una alternativa basada en la aplicación de señales sinusoidales desfasadas, basando este modo de locomoción en los utilizados en ciertos modos de marcha de robots serpentinicos.

Es preciso no obstante realizar ciertas modificaciones a la señal sinusoidal pura. En concreto es necesario agregar un valor de saturación a las señales sinusoidales, al objeto de garantizar que el punto de apoyo del robot se mantiene mientras se realiza el desplazamiento, al mismo tiempo que se facilita el control de robots con un número mayor de cuerpos ya que solamente es necesario cambiar la frecuencia del movimiento y el desfase entre las señales para obtener un movimiento peristáltico.

4 Conclusiones y trabajo futuro

4.1 Conclusiones

Se ha comprobado como la elección de un patrón adecuado de movimiento tiene efectos directos sobre la eficiencia en la locomoción de un robot gu-

sano, Para un mismo terreno y robot, se obtienen diferentes velocidades y eficiencias en el movimiento sin más que utilizar un patrón de marcha u otro o modificando los parámetros que definen el patrón.

Así se ha verificado que el primer patrón de movimiento, donde en cada fase del movimiento se cambia de estado dos segmentos a la vez, se obtiene una velocidad de casi el doble que en los otros dos casos. Se observa que la frecuencia de la zancada es casi idéntica en los dos primeros casos, mientras que en el tercero es aproximadamente la mitad. Esto se asocia claramente al hecho de que las dos primeras secuencias tienen cuatro fases mientras que la tercera tiene ocho y teniendo en cuenta que la velocidad del actuador se ha mantenido inalterable de una secuencia a otra el resultado obtenido ha estado acorde con lo esperado.

En el segundo patrón de movimiento se ha observado que no hay deslizamiento hacia atrás en el robot. Esto se debe a que en esta secuencia de movimientos, siempre hay tres segmentos sujetándose a la superficie. Esta secuencia puede ser muy útil en superficies con bajos índices de rozamiento. Por último el tercer patrón de movimientos genera un retroceso muy alto, que se debe a que en una fase del movimiento el robot se queda sin punto de sustento.

Al revisar la velocidad de progresión, que debería ser la misma en todos los casos, teniendo en cuenta que la velocidad de los actuadores es la misma en todos los ellos, se encuentra que hay variaciones significativas sobre todo en el tercer patrón de movimiento. Esto puede deberse al gran retroceso presentado en esta secuencia de movimiento.

4.2 Trabajo Futuro

En la actualidad se están definiendo y evaluando nuevos patrones de movimiento, o algunas variaciones de los presentados, buscando una mayor eficiencia en la locomoción. Además se está evaluando los efectos que las características del entorno (fricción, pendiente, etc.) tienen en la locomoción en combinación con el modo de marcha elegido, al objeto de seleccionar, para cada tipo de entorno el modo de marcha más adecuado.

La aplicación de este análisis se llevará a cabo en un robot real que se está construyendo. El robot constará de cuatro cuerpos de látex accionados por actuadores de aleación con memoria de forma SMA (Shape Memory Alloy), cada segmento del cuerpo contendrá un volumen de agua fijo, lo cual permitirá simular correctamente el comportamiento observado en la lombriz de tierra.

Además se pretende extender el análisis a robots tipo gusano con más cuerpos, utilizando funciones diferentes que permitan realizar el control de un elevado número de segmentos de manera sencilla y eficiente.

Agradecimientos

Los autores desean manifestar su gratitud la comunidad de Madrid por su financiación a través del proyecto ROBOCITY 2030 (S-0505/DPI/ 00235)

Referencias

Gray, J., & Lissmann, H. W. 1938. Studies In Animal Locomotion: VII. Locomotory Reflexes In The Earthworm. *Journal of Experimental Biology* (15): 506-517.

Kassim, I., Phee, L., Ng, W., Gong, F., Dario, P., & Mosse, C. 2006. Locomotion techniques for robotic colonoscopy. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 25(3): 49-56.

Michel, O. (2004). Webots TM: Professional Mobile Robot Simulation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1(1): 39-42.

Omori, H., Hayakawa, T., & Nakamura, T. 2008. Locomotion and Turning Patterns of a Peristaltic Crawling Earthworm Robot Composed of Flexible Units. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*.

Quillin, K. J. 1999. Kinematic Scaling Of Locomotion By Hydrostatic Animals: Ontogeny Of Peristaltic Crawling By The Earthworm *Lumbricus Terrestris*. *The Journal of Experimental Biology* (202): 661-674.

Saga, N., Nakamura, T., & Ueda, S. 2003. Study on Peristaltic Crawling Robot Using Artificial Muscle Actuator. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*.

