

“Soft Robotic”: Una nueva generación de robots

José Medina H.¹, Paulina Vélez N.²

¹ Robotics Lab., Dpto. Ing. de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.

² Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Autores para correspondencia: jomedina@ing.uc3m.es, pvelez@esoch.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

La necesidad de crear robots que puedan interactuar, de una forma más fácil y efectiva con el mundo real, ha traído consigo un creciente interés en el uso de nuevos materiales y morfologías robóticas no convencionales. Este artículo sirve de introducción al área de la robótica suave o “soft robotic”, como una alternativa segura, robusta y eficiente para la interacción física en entornos dinámicos y no estructurados. Además, plantea los desafíos que conlleva este cambio de paradigma desde diferentes puntos de vista.

Palabras clave: Robótica, robótica suave, robots bioinspirados, cuerpo inteligente.

ABSTRACT

The necessity to create robots that can interact in an easy and effective way with the real world brings an increasing interest to use new materials and unconventional morphologies of robotics. This paper serves as an introduction to the soft robotics field, as a safe, efficient and robust alternative to interact in a dynamic and unstructured environment. In addition, it raises the challenges of this paradigm shift from different points of view.

Keywords: Robotics, soft robotics, bioinspired robots, embodied intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

El manipulador industrial ha sido ideado como una cadena cinemática, normalmente abierta, de varios grados de libertad, formado por eslabones y articulaciones. Los eslabones son por definición estructuras con muy poca capacidad de deformación elástica, habitualmente de acero o aluminio, que unen una articulación con otra desde la base hasta un efector final. Las articulaciones permiten el movimiento relativo entre eslabones consecutivos, gracias a un sistema de actuación y de transmisión, que está acoplado a cada eslabón.

El uso de eslabones y componentes de transmisión rígidos ha permitido conseguir sistemas robóticos precisos, rápidos y relativamente fáciles de controlar. Características ideales en las aplicaciones industriales, donde el manipulador se encuentra en un entorno altamente estructurado, realizando tareas repetitivas a alta velocidad. Sin embargo, la posibilidad de utilizar robots para ayudar a los seres humanos fuera del ámbito estrictamente industrial, ha traído consigo nuevas demandas a la hora de diseñar. Quedando cada vez más claro que el enfoque de cuerpos rígidos tiene limitaciones significativas, relacionadas con la seguridad, eficiencia y capacidad de interactuar con el entorno.

Las nuevas generaciones de robots de servicio no pueden continuar dependiendo de estructuras rígidas, cuyo desempeño y sistema de seguridad descansa únicamente en la estrategia de control, tal como fueron ideados los robots industriales. La morfología, las propiedades de los materiales que lo componen y el entorno en el que se encuentra, son factores de suma importancia al momento de diseñar robots con la versatilidad, adaptabilidad, eficiencia y seguridad que reclaman las nuevas aplicaciones.

De hecho, posiblemente muchas de las capacidades de los nuevos robots no sean solamente una consecuencia directa de un avanzado sistema de control, sino el resultado natural de la explotación adecuada de su dinámica pasiva. Para lograr esto es necesario un diseño físico basado en el entorno, y en el tipo de interacción que tendrá el robot con el mismo, de manera que las propiedades físicas del robot faciliten un determinado comportamiento dinámico (Pfeifer & Bongard, 2007). Una propiedad que puede aportar parte de esta “inteligencia mecánica”, a las nuevas generaciones de robots, es la elasticidad. Los nuevos robots, conocidos como robots suaves o blandos, están constituidos parcial o totalmente por materiales con una gran capacidad de deformación elástica, principalmente líquidos, geles, polímeros blandos y otros materiales fácilmente deformables.

En este artículo se examinan los nuevos sistemas robóticos de cuerpo blando, su inspiración biológica, los tipos de actuadores y sensores utilizados en ellos, los nuevos prototipos y los retos presentes. Siendo el objetivo fundamental del mismo dar a conocer un área de investigación que apenas comienza pero que tiene un amplio porvenir.

2. ¿QUÉ ES UN “SOFT ROBOT”?

El término “soft robot” está siendo utilizado para identificar a robots con características morfológicas y constitutivas no convencionales. Sin embargo, el concepto de suavidad, en este caso, puede ser muy amplio e incluso hacer referencia a características muy diferentes.

El primer enfoque de la idea de suavidad, hace referencia a robots convencionales que han sido modificados para tener un comportamiento más seguro, dado que comparte espacio de trabajo con los seres humanos. Se puede mencionar por ejemplo a los robots con cubiertas blandas (Sugaiwa *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2011), los manipuladores ligeros modulares (Bischoff *et al.*, 2010), los manipuladores actuados por tendones (Lens *et al.*, 2012) y los actuadores flexibles serie (Paine *et al.*, 2014) o variable (Bicchi *et al.*, 2005).

Sin embargo, un enfoque más revolucionario del concepto de suavidad, hace referencia a robots intrínsecamente blandos, robots construidos por materiales cuyo módulo de elasticidad está en el orden de 10^2 - 10^6 Pa, es decir entre 3 y 10 órdenes de magnitud menos rígidos que los robots convencionales (Majidi, 2014). La unión de estos materiales con mecanismos que permiten variar su forma, modular su rigidez, cambiar las propiedades superficiales y/o facilitar la detección de formas; constituyen lo que se conoce hoy como un robot suave.

Los robots suaves ofrecen un mecanismo más poderoso para interactuar de una manera fácil y efectiva con el entorno real. Es por ello que las aplicaciones desarrolladas, hasta el momento, están orientadas a la interacción directa y segura con los seres humanos, la locomoción en ambientes no estructurados y el agarre robusto y eficaz de objetos.

La Fig. 1 muestra un conjunto de robots suaves que han o están siendo desarrollados, y servirán para ilustrar este concepto. La Fig. 1A muestra un robot inspirado en el tentáculo de un pulpo, su estructura consiste en una fibra plástica trenzada y deformable, que es actuada transversal y longitudinalmente a través de alambres con memoria de forma, para obtener deformaciones locales y ajustar la rigidez del cuerpo blando (Margheri, 2012; Mazzolai, 2012). La Fig. 1B muestra un robot suave bioinspirado en una estrella de mar, el cuerpo del robot es un elastómero con diferentes cavidades de aire distribuidas, su movimiento se logra gracias a la presión neumática correctamente aplicada a lo largo de las cavidades (Shepherd *et al.*, 2011). La Fig. 1C se trata de una pinza universal, un globo relleno de café molido que cuando se posa sobre un objeto, fluye alrededor de él y se ajusta a su forma, luego, al aplicar vacío se endurece rápidamente para tomar al objeto sin necesidad de

ninguna realimentación sensorial (Amend *et al.*, 2012). En la Fig. 1D se ilustra uno de los pocos ejemplos de manipuladores con tecnología suave, se trata de la trompa automatizada de Festo (Grzesiak *et al.*, 2011), cuenta con nueve actuadores neumáticos deformables a lo largo de su cuerpo, y una pinza que se moldea al contorno del objeto. Finalmente, en la Fig. 1E se puede ver a GoQBot (Lin, 2011), uno de los tantos gusanos robotizados que existen, este posee un cuerpo alargado que puede deformarse circularmente de forma muy rápida, liberando la energía elástica almacenada, pudiendo así saltar y rodar.

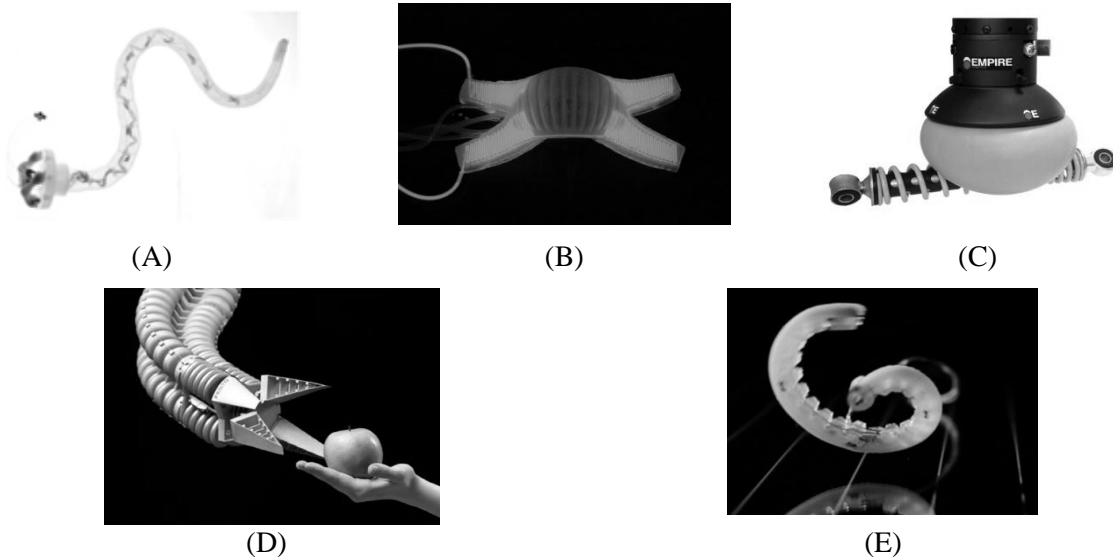


Figura 1. Ejemplos de robots intrínsecamente suaves: (A) Optopus Robot (Margheri, 2012), (B) Starfish robot (Shepherd *et al.*, 2011), (C) Universal Gripper (Amend *et al.*, 2012), (D) Bionic Handling Assistant (Grzesiak *et al.*, 2011), y (E) GoQBot (Lin, 2011).

Una de las mayores potencialidades de la robótica suave, no es tan evidente a simple vista, y se trata de la simplificación de las estrategias de control para el desarrollo de actividades que a priori serían muy complejas de controlar desde el punto de vista de la robótica convencional. La morfología y el material permiten simplificar el control, tal como ocurre en la naturaleza (Pfeifer & Bongard, 2007). Por ejemplo, si se considera nuevamente a la pinza universal (Fig. 1C), esta pinza es capaz de coger objetos de pesos y formas diferentes, sin necesidad de identificación previa, planificación de orientación o control de impedancia; solo se posa sobre el objeto y con una acción on/off puede coger y soltar prácticamente cualquier cosa.

3. INSPIRACIÓN BIOLÓGICA

En el reino animal se encuentra un sinnúmero de cuerpos con estructuras suaves y deformables, pero a la vez robustas. Diferentes especies han adaptado su estructura y forma al medio donde viven, tanto para movilizarse, como para alimentarse y protegerse de los predadores. Estas características han servido de inspiración a los diseñadores y desarrolladores de robots, quienes han decidido aprovechar las ventajas de la estructura física y anatómica de ciertas especies. La flexibilidad y estructura de los cuerpos, diseño de patas y garras, diseño de alas, capacidad de desplazamiento en superficies irregulares o extremadamente planas y capacidad de vuelo en condiciones complejas, son algunas de estas características. Estos robots están siendo utilizados en tareas de monitoreo aéreo, exploración del fondo marino, navegación remota para asistir en tareas de búsqueda y rescate.

En la Fig. 2, se muestran algunos ejemplos de robots y micro robots suaves, cuyo funcionamiento y estructura han sido inspirados en la anatomía y comportamiento de los animales.

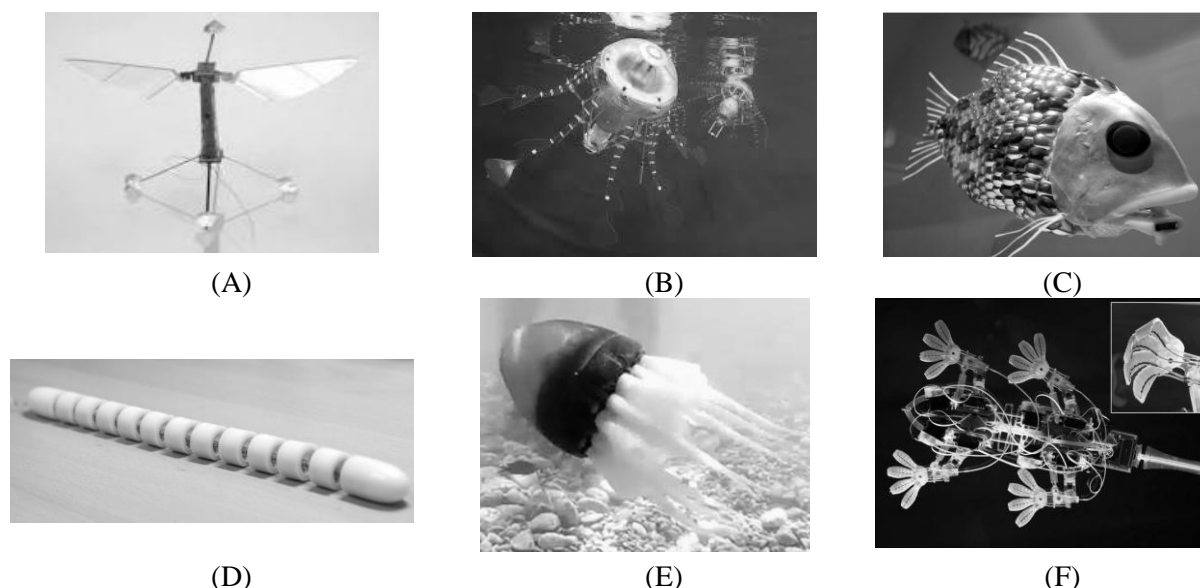


Figura 2. Robots Bio Inspirados: (A) RoboBee. Micro robot bioinspirado - Con 3 cm de largo entre sus alas y una cámara. Es utilizado en tareas de exploración (Wood *et al.*, 2012). (B) Aquajelly robot. Es un robot suave submarino capaz de realizar interacción multimodal y recargarse bajo el agua (Kernbach *et al.*, 2011). (C) Robot Fish. Imita el movimiento de los peces para deslizarse en el fondo marino. Es utilizado en tareas de exploración del fondo marino y capaz de medir la polución del agua (Oyekan, 2013). (D) Earth worm. Se mueve con movimientos peristálticos. Es capaz de moverse en cualquier superficie, es resistente a los golpes, puede ser lanzado desde el aire al suelo sin sufrir daños (Yuk *et al.*, 2010). (E) Octopus. Robot submarino, actualmente de dos tentáculos, que imita el movimiento de los tentáculos de un octópodo para alcanzar y agarrar cosas (Sfakiotakis *et al.*, 2013). (F) Stickybot. Inspirado en la capacidad de movilidad de las lagartijas, es capaz de desplazarse verticalmente en superficies planas como vidrio o plástico, esto por el sistema de agarre de sus patas (Sangbae *et al.*, 2008).

Otro modelo que ha servido como inspiración biológica para los desarrolladores de robots, es el cuerpo humano, que posee un conjunto de estructuras blandas y elásticas como el corazón, lengua, esófago y uno de los más grandes y notorios, la piel.

La piel es un órgano del cuerpo humano que a pesar de ser blando y deformable es tan resistente como para proteger los órganos internos, y adicionalmente impermeable, y resiste altas temperaturas. Siendo uno de los órganos más extensos, la piel es de grosor variable según la zona que esté recubriendo, y totalmente dotado de un conjunto de sensores distribuidos de forma no homogénea en todo el organismo (Pfeifer *et al.*, 2012). La sensación, protección y termorregulación son las que más atraen al momento de desarrollar membranas y polímeros que simulen el comportamiento de la piel humana.

Uno de los proyectos que se han desarrollado basados en las características de la piel humana es el “Jamming Skin” (Steltz *et al.*, 2009), el cual simula el comportamiento de la elasticidad de la piel humana utilizando la tecnología jamming. Un robot suave, el JSEL (Jamming Skin Enabled Locomotion) es uno de los prototipos desarrollados con esta tecnología, el cual es capaz de deformarse y desplazarse al hacer cambios en su estructura (Steltz *et al.*, 2009). Otro modelo inspirado en la piel humana es el e-skin, una membrana capaz de captar la presión y temperatura de los cuerpos con los que tiene contacto, además de ser flexible (Ranganath *et al.*, 2011).

Órganos humanos internos han sido desarrollados utilizando la robótica suave, llegando al campo de la medicina. Un ejemplo de esto es el corazón de Carmat, el cual es un órgano robótico suave capaz de bombear la sangre del huésped 35 millones de veces al año y posee un tiempo de vida útil de 5 años (Agency European Space, 2014).

La robótica suave tiene como objetivo equipar al robot para cubrir necesidades impredecibles, donde sus capacidades no están basadas en el sistema de control sino en las propiedades del material y la morfología de sus cuerpos (Laschi & Cianchetti, 2014). El replicar el funcionamiento de la estructura animal es un reto que se está consiguiendo con la ayuda de actuadores y sensores que permiten alcanzar los niveles de deformidad y control necesarios.

En la Fig. 3 se muestran algunos modelos de los ejemplos descritos.

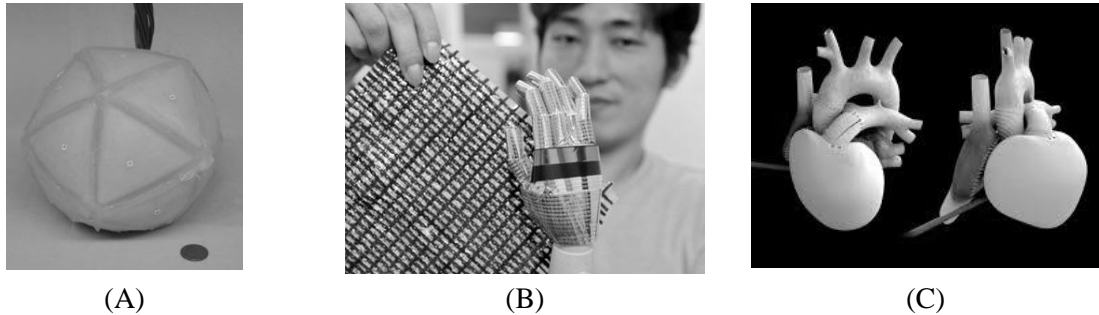


Figura 3. Robots Bio Inspirados en el ser humano: (A) JSEL robot (Steltz *et al.*, 2009). (B) E-Skin (Steltz *et al.*, 2009). (C) Corazón de Carmat (Agency European Space, 2014).

4. TECNOLOGÍA TRAS LA ROBÓTICA SUAVE

La robótica suave conlleva una serie de nuevos desafíos para los expertos en el área. Los robots suaves cuentan con un cuerpo flexible, con la capacidad de deformarse en función del entorno, pero también necesitan de un sistema de actuación y sonorización. Con el objetivo de alcanzar las características de movimiento, comportamiento, flexibilidad, y suavidad requeridas en un robot suave, se han desarrollado varios sensores, actuadores y técnicas de construcción utilizando geles, polímeros y fluidos complejos.

4.1. Actuación

La mayoría de los actuadores convencionales contienen componentes rígidos que limitan su capacidad de deformación, sin embargo, un actuador blando debe poder deformarse junto con la estructura. La utilización de actuadores suaves resulta importante ya que un solo actuador suave permite generar varios grados de libertad, y adicionalmente permite imitar el biomovimiento. La actuación es necesaria para cumplir tareas que incluyen movimiento, cambio de rigidez y cambio de las propiedades superficiales.

Los actuadores suaves pueden agruparse dentro de dos grandes familias, la eléctrica y la neumática:

Actuadores eléctricos suaves

Polímeros electroactivos

Los actuadores de polímeros electroactivos (EAP) son dispositivos fabricados con materiales "inteligentes" capaces de sufrir deformaciones en respuesta a estímulos eléctricos adecuados. Poseen propiedades funcionales y estructurales como: grandes fuerza a tensión, alta densidad de potencia, alta elasticidad mecánica, simplicidad estructural, versatilidad, escalabilidad, libre de ruido acústico, y en la mayoría de los casos son de bajo costo (Carpi & Smela, 2009; O'Halloran *et al.*, 2008).

Los EAP se clasifican comúnmente en dos grandes familias: los EAP iónicos (activados por un transporte inducido eléctricamente de iones y / o moléculas) y los EAP electrónicos (activados por fuerzas electrostáticas). La Tabla 1 muestra ejemplos clasificados de diferentes EAP, junto con las referencias más relevantes.

EAP iónicos: La principal ventaja de los EAP iónicos es su capacidad de respuesta a voltajes extremadamente bajos (en el orden de 1V). Como inconveniente, tienen un desempeño limitado por una vida corta y tiempos de respuesta altos. Esto se debe principalmente al proceso electroquímico de los mecanismos de transducción de energía subyacentes, los cual conduce a la degradación del material y la reducción de la velocidad de respuesta (Bar-Cohen *et al.*, 2001).

EAP electrónicos: Los EAP electrónicos se basan en materiales que responden a un campo eléctrico. La principal ventaja es la posibilidad de lograr grandes fuerzas a tensión y compresión, tener una respuesta rápida y larga vida útil. Una desventaja potencial es que los actuadores electrónicos actualmente requieren campos eléctricos de altos (hasta el orden de 100 V μm^{-1}) debido a la naturaleza electrostática de sus mecanismos de activación. La reducción de la magnitud del campo eléctrico (a través de mejoras materiales, como el aumento constante dieléctrica) podría ampliar la aplicabilidad en esta área, debido a la necesidad de altos voltajes (en el orden de 1 kV). Otro inconveniente es la necesidad de un marco rígido donde estirar el material y una necesaria mejora en los electrodos que actualmente se utilizan para su diseño (Capri *et al.*, 2011).

Tabla 1. Clasificación de EAP.

Tipo	Material	Referencia
Ionic EAPs	Gel polímero	(Tanaka <i>et al.</i> , 1982)
	Polímero iónico-metal composites	(Asaka & Oguro, 2000)
	Polímero conjugado	(Baughman, 1996)
	Nanotubos de carbono	(Baughman <i>et al.</i> , 1999)
Electronic EAPs	Polímero piezoeléctrico	(Nalwa, 1995)
	Polímero electrostrictico	(Pelrine <i>et al.</i> , 2000)
	Elastómero dieléctrico	(Lehmann, 2001)
	Elastómero de cristal liquido	(Aliev, 2009)
	Aerogel de nanotubos de carbono	(Kim <i>et al.</i> , 2009)

Aleaciones con memoria de forma

Son aleaciones metálicas que después de una deformación aparentemente plástica vuelven a su forma original tras el calentamiento. Tiene una elevada relación fuerza–peso, son mecánicamente muy simples, de fácil miniaturización, bajo precio y alta biocompatibilidad. Sin embargo, como desventaja destaca que la generación de fuerza depende de los cambios de temperatura, lo que los hace lentos y dada su histéresis difícil de controlar. Además, tienen muy baja eficiencia (menor al 1%) debido a que gran parte de la energía se transforma en calor, lo que conlleva también a degradación y fatiga (Kim *et al.*, 2009).

Actuadores neumáticos suaves

PneuNets

Los actuadores elastoméricos accionados neumáticamente son de interés en la robótica suave ya que son capaces de proporcionar un movimiento no lineal (Mosadegh *et al.*, 2013). PneuNets es un actuador suave compuesto de una serie de canales y cámaras dentro de un elastómero, estos canales se inflan al ser presurizados, creando movimiento. El movimiento se controla modificando la geometría de las cámaras embebidas. Cuando se aplica aire presurizado al actuador la expansión se produce en las regiones menos rígidas (Mosadegh *et al.*, 2013).

Las PneuNets son suficientemente resistentes permitiendo sostener una frecuencia intermedia (4Hz), y producir movimientos de gran amplitud en ciclos repetidos y sin fallos. Su comportamiento es el siguiente: a menor presión, se doblan formando un círculo con todas sus cámaras infladas uniformemente, mientras que a mayor presión se dobla sobre sí mismo, al inflar primero las cámaras superiores (Mosadegh *et al.*, 2013).

En cuanto a las desventajas que presenta este actuador se tienen las siguientes:

- Se requiere grandes transferencias de gas para el accionamiento, por lo que la tasa de accionamiento es lenta.

- Se genera un cambio significativo de volumen de actuador, por lo que se requiere que el sistema esté rodeado por un gran volumen de espacio libre para operar.
- Se impone a altas tensiones al material de la pneu-net.

McKibben

Conocido también como PAM o músculo artificial neumático, es un dispositivo contráctil, que al aplicarle aire presurizado es capaz de generar fuerzas y desplazamientos no lineales (Kim *et al.*, 2013). Físicamente es un músculo trenzado, cilíndrico, de forma helicoidal, que tiene a ambos lados tubo y funda, accesorios que no sólo sirven para tensionar la fibra de transferencia, sino también para el ingreso y cierre del fluido del gas (Daerden & Lefeber, 2001). Estos actuadores pueden alcanzar una magnitud de carga similar a la de un músculo, pero poseen un solo modo de actuación, la contracción (Ilievski *et al.*, 2011).

Su comportamiento dinámico y costo reducido son ventajas frente a otros modelos de actuadores neumáticos suaves. En cuanto a sus desventajas se tiene el tiempo de respuesta elevado especialmente al momento de despresurizar el actuador, y por ende presencia de histéresis.

4.2. Sensores

Los sensores flexibles constituyen uno de los retos más grandes que tiene tras de sí la robótica suave. Muchos de estos robots cuentan con sensores rígidos de pequeño tamaño embebidos dentro del cuerpo del robot o dispuestos fuera de los mismos (Jentoft *et al.*, 2013) (Fig. 4A). Otros sensores optan por el uso de metales líquidos dentro de microcanales flexibles (Yong-Lae *et al.*, 2012), como se observa en la Fig. 4B.

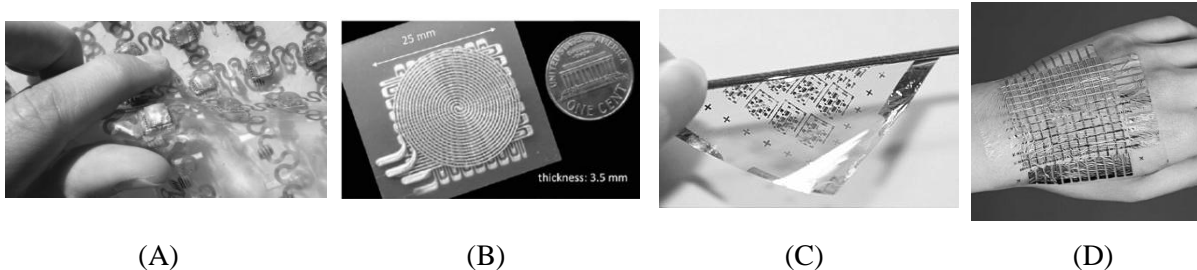


Figura 4. Sensores suaves: (A) MEMS distribuidos en un arreglo flexible (Jentoft *et al.*, 2013), (b) EGaIn Sensors (Yong-Lae *et al.*, 2012), (c) transistores orgánicos flexibles (Sekitani *et al.*, 2010), y (d) electrónica plástica ultra ligera (Kaltenbrunner *et al.*, 2013).

Sin embargo, en los últimos años han aparecido algunas alternativas ultra-flexibles que pueden permitir un avance considerable en esta área. La Fig. 4C muestra un sistema de transistores orgánicos en una película flexible base con un espesor de 12 μm , el cual podría ser doblado sin causar mayor degradación (Sekitani *et al.*, 2010). La Fig. 4D muestra lo que al día de hoy es el circuito más ligero y flexible que existe, con un espesor total de sólo 2 μm . Contiene una matriz de transistores orgánicos junto con un panel frontal táctil resistivo, que pesa 3 g m^{-1} , y que puede ser envuelto en un radio de 5 μm y arrugado como un trozo de papel (Kaltenbrunner *et al.*, 2013).

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado una descripción sobre la robótica suave donde se cubren aspectos como definiciones, tecnologías dentro de las cuales se encuentran descritos los sensores y actuadores utilizados en el diseño y construcción de un robot suave, materiales y aplicaciones existentes. Esta es una recopilación de información que se encuentra dispersa al ser éste un área de investigación reciente.

Los robots suaves presentan características de flexibilidad, resistencia, robustez y versatilidad que los robots convencionales no poseen. Esto los convierte en una opción valiosa al momento de diseñar sistemas robotizados donde la seguridad del usuario y la flexibilidad son de máxima importancia.

La bioinspiración ha servido para superar retos de movilidad y navegación que un robot convencional jamás podría alcanzar. Los robots suaves bioinspirados, al igual que los animales, han logrado enfrentar características de ambientes hostiles sin dificultad. Sin embargo, aún hace falta avanzar en el desarrollo de nuevos actuadores, sensores, y materiales suaves que permitan un desarrollo más efectivo y eficiente de este tipo de robots.

La robótica suave abre la puerta a nuevos diseños robóticos, formas de control, actuación y sensorización; incrementado los retos en el desarrollo de sistemas robóticos. El interés que esta área ha despertado dentro de la comunidad científica, es palpable en el gran número de nuevos prototipos que han sido desarrollados en los últimos cinco años.

REFERENCIAS

- Agency European Space, 2014. Space technology informs artificial heart development. *MedicalXpress*.
- Aliev, A.E., 2009. Giant-stroke, superelastic carbon nanotube aerogel muscles. *Science*, 323, 1575-1578.
- Amend, J., E. Brown, N. Rodenberg, H. Jaeger, 2012. A positive pressure universal gripper based on the Jamming of granular material. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2), 341-350.
- Asaka, K., K. Oguro, 2000. Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli: Part II. Response kinetics. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 480, 186-198.
- Bar-Cohen, Y., S. Sherrit, S-S. Lih, 2001. Characterization of the electromechanical properties of EAP materials. *Proc. SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*.
- Baughman, R., 1996. Conducting polymer artificial muscles. *Synthetic Metals*, 78(3), 339-353.
- Baughman, R., C. Cui, A. Zakhidov, Z. Iqbal, J. Barisci, G.M. Spinks, G.G. Wallace, A. Mazzoldi, D. De Rossi, A.G. Rinzler, O. Jaschinski, S. Roth, M. Kertesz, 1999. Carbon nanotube actuators. *Science*, 284(5418), 1340-1344.
- Bicchi, A., G. Tonietti, M. Bavaro, M. Piccigallo, 2005. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control. *In Robotics research*. Springer Berlin Heidelberg, 527-536.
- Bischoff, R., J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppe, A. Albu-Schaeffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald, G. Hirzinger, 2010. The KUKA-DLR Lightweight Robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing. *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, 1-8.
- Capri, F., R. Kornbluh, G. Alici, 2011. Electroactive polymer actuators as artificial muscles: Are they ready for bioinspired applications? *Bioinspiration & Biomimetics*, 6(4).
- Carpi, F., V. Smela, 2009. *Biomedical applications of electroactive polymer actuators*. Wiley Online Library.
- Daerden, F., D. Lefeber, 2001. Pleated pneumatic artificial muscles: actuators for automation and robotics. *Proceedings 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2, 738-743.
- Grzesiak, A., R. Becker, A. Verl, 2011. The bionic handling assistant: a success story of additive manufacturing. *Assembly Automation*, 31(4), 329-333.
- Ilievski, F., A. Mazzeo, R. Shepherd, X. Chen, G. Whitesides, 2011. Soft robotics for chemists. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 1890-1895.

- Jentoft, L.P., Y. Tenzer, D. Vogt, J. Liu, R.J. Wood, R. Howe, 2013. Flexible, stretchable tactile arrays from MEMS barometers. *The 16th International Conference on Advanced Robotics*, 6 pp.
- Jones, A.S., 1999. On the complexity of computing. *Advances in Computer Science*, 555-566.
- Kaltenbrunner, M., T. Sekitani, J. Reeder, T. Yokota, K. Kuribara, T. Tokuhara, M. Drack, I. Graz, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, T. Someya, 2013. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature*, 499, 458-463.
- Kernbach, S., T. Dipper, D. Sutantyo, 2011. Multi-modal local sensing and communication for collective underwater systems. *Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Robots and Competitions*, 96-101.
- Kim, S., E. Hawkes, K. Cho, M. Jolda, J. Foley, R. Wood, 2009. Intelligent robots and systems. *IEEE/RSJ International Conference on IROS*, 2228 - 2234.
- Kim, S., C. Laschi, B. Trimmer, 2013. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology*, 31(5), 287-294.
- Knuth, D.E., 1984. *The Text Book*. Addison-Wesley, 483 pp.
- Laschi, C., M. Cianchetti, 2014. Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2(3), 1-5.
- Lehmann, W., 2001. Giant lateral electrostriction in ferroelectric liquid-crystalline elastomers. *Nature*, 410, 447-450.
- Lens, T., O. Von Stryk, A. Karguth, 2012. Safety properties and collision behavior of robotic arms with elastic tendon actuation. *Proceedings of the 7th German Conference on Robotics*, 1-6.
- Lin, H., 2011. GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. *Bioinspir. Biomim.*, 6, 026007.
- Majidi, C., 2014. Soft robotics: A perspective - Current trends and prospects for the future free access. *Soft Robotics*, 1(1), 5-11.
- Margheri, L., 2012. Soft robotic arm inspired by the octopus: I. From biological functions to artificial requirements. *Bioinspir. Biomim.*, 7(2), .
- Mazzolai, B., 2012. Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspir. Biomim.*, 7(2).
- Mosadegh, B., P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C.J. Walsh, G.M. Whitesides, 2013. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. *Advanced Functional Materials* , 20 pp.
- Nalwa, H.S., 1995. *Ferroelectric polymers: Chemistry, physics and applications*. CRC Press, Technology & Engineering, 912 pp.
- O'Halloran, A., F. O'Malley, P. McHugh, 2008. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *AIP Journal of Applied Physics*, 104.
- Oyekan, J., 2013. A creative computing approach to 3D robotic simulator for water pollution monitoring. *Int. J. Creative Computing*, 1(1), 92-119.
- Paine, N., O. Sehoon, L. Sentis, 2014. Design and control considerations for high-performance series elastic actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3), 1080-1091.
- Park, J., S. Haddadin, J. Song, A. Albu-Schäffer, 2011. Designing optimally safe robot surface properties for minimizing the stress characteristics of human-robot collisions. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5413-5420.
- Pelrine, R., R. Kornbluh, O. Pei, J. Joseph, 2000. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science*, 287, 836-839.
- Pfeifer, R., J. Bongard, 2007. *How the body shapes the way we think: A new view of intelligence*. MA: MITPress, 394.
- Pfeifer, R., M. Lungarella, F. Iida, 2012. The challenges ahead for bio-inspired 'soft' robotics. *Communications of the ACM*, 55(11), 76-87.
- Ranganath, K., P. Krupali, M. Sravanthy, 2011. Electronic skin-the sense of touch. *IJCSET*, 1(7), 387-390.

- Renault, R.B., 1991. *3D hierarchies for animation*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Sangbae, K., M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, D. Santos, M. Cutkosky, 2008. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 65-74.
- Sekitani, T., U. Zschieschang, H. Klauk, T. Someya, 2010. Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability. *Nature Materials*, 9, 1015-1022.
- Sfakiotakis, M., A. Kazakidi, N. Pateromichelakis, 2013. Octopus-inspired eight-arm robotic swimming by sculling movements. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5155-5161.
- Shepherd, R., F. Ilievski, W. Choi, S. Morin, A. Stokes, A. Mazzeo, 2011. Multigait soft robot. *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A.*, 108.
- Steltz, E., A. Mozeika, N. Rodenberg, E. Brown, H. Jaeger, 2009. JSEL: Jamming skin enabled locomotion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 5672-5677.
- Sugaiwa, T., H. Iwata, S. Sugano, 2008. Shock absorbing skin design for human-symbiotic robot at the worst case collision. *8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 481-486.
- Tanaka, T., I. Nishio, S. Sun, S. Ueno-Nishio, 1982. Collapse of gels in an electric field. *Science*, 218, 467-469.
- Wood, R., B. Finio, M. Karpelson, K. Ma, N.O. Pérez-Arancibia, P.S. Sreetharan, H. Tanaka, J.P. Whitney, 2012. Progress on pico air vehicles. *Journal International Journal of Robotics Research*, 31, 1292-1302.
- Yong-Lae, P., C. Bor-Rong, R.J. Wood, 2012. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors. *IEEE/Sensors Journal*, 12(8), 2711.
- Yuk, H., J.H. Shin, J. Sungho, 2010. Design and control of thermal SMA based small crawling robot mimicking *C. elegans*. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 407-412.