

Robots Hiper-Redundantes: Clasificación, Estado del Arte y Problemática

A. Martín*, S. Terrile, A. Barrientos, J. del Cerro

Centro de Automática y Robótica (CAR-UPM-CSIC), Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal, n°2, 28006, Madrid, España.

Resumen

Los robots hiper-redundantes son aquellos que tienen un número muy elevado de grados de libertad. En su uso cotidiano, la *redundancia* es referida para indicar una repetición o un uso excesivo de un concepto. En el campo de la robótica, la redundancia puede ofrecer numerosos beneficios frente a los robots convencionales. Los robots hiper-redundantes poseen una mayor habilidad para sortear obstáculos, son tolerantes a fallos en algunas de sus articulaciones y también pueden ofrecer ventajas cinemáticas. En este artículo se presentan los conceptos generales para entender este tipo de robots, así como una clasificación de los mismos, su potencial, su problemática y su evolución a lo largo de la historia.

Palabras Clave:

Sistemas robotizados, Cinemática de robots, Sistemas subactuados, Robots hiper-redundantes, Robots continuos, Robots blandos

Hyper-Redundant Robots: Classification, State-of-the-Art and Issues

Abstract

Hyper-redundant robots are characterized by having a high number of degrees of freedom. The word redundant is commonly used to mean a repetition or excess of a concept. In the robotics scope, redundancy offers numerous advantages against traditional robots. Hyper-redundant robots provide better skills to avoid obstacles, they are fault-tolerant in some of their joints and exhibit kinematic advantages. This article presents general concepts to understand this kind of robots as well as a classification, their potential, drawbacks and an analysis of their evolution throughout their history.

Keywords:

Robotic systems, Robot kinematics, Underactuated systems, Hyper-redundant robots, Continuous robots, Soft robots

1. Introducción

En robótica, el concepto de *Grado de Libertad* (GdL) tiene una relevancia destacable. Se define como el número de movimientos o parámetros independientes que definen la configuración de un robot (Barrientos 2007). Para que un robot manipulador posicione y oriente correctamente su extremo en un espacio tridimensional, es necesario que disponga de, al menos, 6 GdL: 3 para determinar la posición y 3 para determinar la orientación. Por lo tanto, aquellos robots que tengan más grados de libertad controlables que los mínimamente necesarios para posicionarse y orientarse en su espacio de trabajo presentarán cierto nivel de redundancia. Los *robots hiper-redundantes* son aquellos que poseen un número de grados de libertad muy superior al mínimo requerido para realizar una determinada tarea (Chirikjian 1992).

Las configuraciones hiper-redundantes ofrecen una serie de ventajas frente a los robots convencionales (Chirikjian and Burdick 1994). Entre ellas, destacan mejores habilidades cinemáticas, una mayor facilidad para sortear obstáculos o una mayor tolerancia a fallos.

Entre las ventajas cinemáticas, se encuentra la posibilidad de maximizar la transmisión de fuerza de los actuadores, encontrando la solución que mejor proyecte la fuerza al efector final; la disponibilidad del rango de las articulaciones, manteniéndolas lo más cerca de sus posiciones centrales; la destreza, proponiendo soluciones que doten de una mayor maniobrabilidad al efector final; o el ahorro energético, gestionando eficientemente velocidades e inercias.

Por otro lado, debido al elevado número de GdL, los robots hiper-redundantes gozan de una gran versatilidad que les

*Autor para la correspondencia: andres.mb@upm.es

permite trabajar en escenarios complejos. Su morfología ofrece una amplia variedad de soluciones para resolver problemas de *planificación de movimientos* en entornos con obstáculos (Chirikjian 1992).

También, de acuerdo con algunos investigadores, estos robots son tolerantes a fallos (Chirikjian and Burdick 1994). De esta manera, si alguna de sus articulaciones falla, el robot podrá reorganizarse haciendo uso del resto de sus articulaciones para continuar desempeñando sus funciones adecuadamente. Un robot no redundante, frente a la misma situación, no tendrá la capacidad suficiente para cumplir con sus tareas de forma apropiada si una de sus articulaciones falla. Esta propiedad es de gran importancia en el campo de la robótica espacial, dado que los robots no pueden ser reparados tras ser lanzados al espacio. Algunos autores han analizado estas propiedades utilizando arquitecturas de control distribuido (Kimura, Takahashi et al. 1998).

Actualmente, el impacto en la investigación de sistemas hiper-redundantes ha aumentado considerablemente con la proliferación de robots blandos (Figura 1). Sin embargo, y a pesar de que el estudio de los robots hiper-redundantes tiene un recorrido de más de dos décadas, su uso no ha sido muy extendido aparte de en el ámbito investigador. En opinión de los autores, esto es debido principalmente a tres razones. Por un lado, porque su diseño mecánico y su implementación muchas veces son percibidos como innecesariamente complejos. Por otro lado, porque las técnicas clásicas de modelado cinemático y de planificación de movimientos no han sido particularmente eficientes o bien adaptadas a las necesidades de los robots hiper-redundantes (Chirikjian and Burdick 1994). Y también porque un elevado número de GdL habitualmente se traduce en un elevado coste de diseño y de producción.

En este artículo se va a presentar una clasificación actualizada de los robots hiper-redundantes con el fin de facilitar su comprensión. También, se van a analizar sus características, su potencial y algunos de los modelos más representativos del estado del arte. Y, por último, se analizará la problemática más importante a la que se enfrenta la investigación de este tipo de robots.



Figura 1: Robot hiper-redundante de tipo continuo y blando compuesto por una funda trenzada provista de aleaciones con memoria de forma (SMA) (Laschi and Cianchetti 2014).

2. Clasificación

Resulta complicado establecer una clasificación precisa de los robots hiper-redundantes. Esto es debido a que las características que se analizan en la robótica redundante habitualmente tienen límites difusos. En algunos trabajos previos, como en (Trivedi, Rahn et al. 2008), se proponen ciertos criterios de clasificación. Sin embargo, estos resultan incompletos, no incluyendo algunos tipos de robots, o no revisando las diferentes formas de actuación en profundidad.

La clasificación que se propone a continuación considera como características a distinguir: su funcionalidad, el número de grados de libertad y de articulaciones, la forma y la localización de sus actuadores y los materiales con los que se han construido. Dicha clasificación puede verse resumida en la Figura 2 y su explicación viene pormenorizada a lo largo de esta sección.

2.1. Según su funcionalidad

Los robots, en la actualidad, se diseñan para diferentes propósitos. En función de esta clasificación se hablará de *robots hiper-redundantes manipuladores, móviles o híbridos*. Los primeros son dispositivos con una base fija capaces de posicionarse para manipular objetos (Hannan and Walker 2001). Mientras que los segundos tienen capacidad de locomoción, es decir, de trasladarse de un lugar a otro (Yu, Ma et al. 2011). En ocasiones, los robots hiper-redundantes manipuladores son situados en una base móvil dando lugar a los llamados *robots hiper-redundantes manipuladores móviles* (Sujan and Dubowsky 2004). En este sentido, existe una última categoría de robots hiper-redundantes llamados *híbridos* por tener capacidades tanto manipuladoras como de locomoción (Wright, Buchan et al. 2012).

2.2. Según el número de grados de libertad

Si se tiene un espacio articular $\bar{q} \in \mathfrak{R}^n$ que define las posibles posiciones y orientaciones del extremo de un robot $\bar{x}_{ee} \in \mathfrak{R}^m$, se dirá que hacen falta n_p parámetros independientes, o GdL, para definir la posición de dicho extremo y también n_o parámetros independientes que definan su orientación. De esta manera, para posicionar y orientar el extremo de un robot adecuadamente en un espacio de dimensión m , se necesitará de un número mínimo n de GdL dados por (1) (Bernal, Flowers-Cano et al. 2009). Por ejemplo, en un espacio tridimensional ($m=3$), los robots necesitan de, por lo menos, 6 GdL para posicionar y orientar su extremo adecuadamente.

$$n = n_p + n_o = m + \frac{m(m-1)}{2} = \frac{m(m+1)}{2} \quad (1)$$

De acuerdo a esta ecuación, se dice que un manipulador no es redundante si tiene un número de GdL menor o igual que los mínimos necesarios para definir la posición y orientación de su extremo.

Los robots no redundantes de tipo $n < m$ tal y como muestra (2a) no serán capaces de maniobrar adecuadamente en todas las dimensiones de su espacio de trabajo. Sin embargo, los robots no redundantes de tipo $n = m$ (2a) sí que podrán.

Aquellos robots que posean más GdL que los mínimamente necesarios se dice que tienen cierto grado de redundancia cinemática, tal y como se especifica en (2b). Atendiendo a esta definición, los robots redundantes aportarán algún GdL adicional a los no redundantes extendiendo sus capacidades de movimiento.

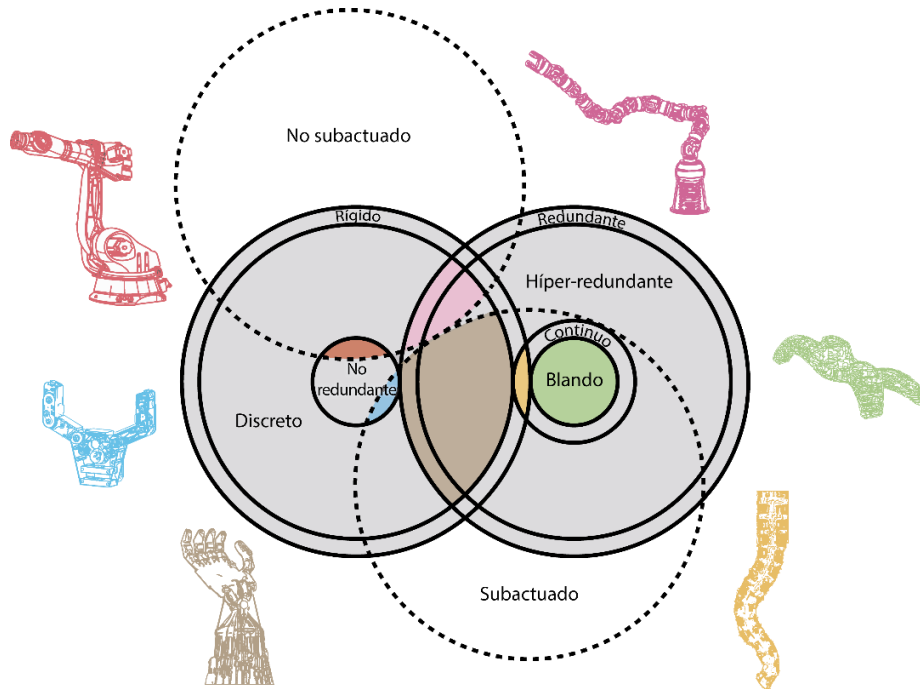


Figura 2: Diagrama de Venn para la clasificación de los robots en función del número de grados de libertad, el número de articulaciones, sus materiales y su actuación. En esta clasificación se han ejemplificado diversos sistemas robóticos (Hannan and Walker 2001, Selic, Reekers et al. 2001, Zhu 2003, Rothling, Haschke et al. 2007, Shepherd, Ilievski et al. 2011, Gonzalez 2014). Las zonas en blanco o en gris son conjuntos vacíos.

Algunos autores han señalado que un robot es hiper-redundante cuando tiene 10 o más GdL (Conkur and Buckingham 1997). Sin embargo, en ningún trabajo se justifica dicho número de GdL para que un robot, además de ser redundante, también se considere hiper-redundante (Chirikjian 1992). Para intentar clarificar dónde se encuentra dicha transición y recopilando la terminología utilizada en la mayor parte de trabajos en esta área, se va a proponer una definición matemática (2c): *Un robot se dirá que es cinemáticamente hiper-redundante cuando tenga, por lo menos, el doble número de GdL que los mínimos necesarios para posicionar y orientar su extremo en un espacio dado.*

$$\text{No redundante: } (n = \dim(\bar{q})) \leq (\dim(\bar{x}_{ee}) = m) \quad (2a)$$

$$\text{Redundante: } (n = \dim(\bar{q})) > (\dim(\bar{x}_{ee}) = m) \quad (2b)$$

$$\text{Híper-redundante: } (n = \dim(\bar{q})) \geq 2(\dim(\bar{x}_{ee}) = m) \quad (2c)$$

La justificación de esta expresión que define a los robots hiper-redundantes también es doble. Por un lado, y como se ha señalado anteriormente, se dice que los robots hiper-redundantes tienen mayores capacidades cinemáticas. Entre ellas, destaca la capacidad de rodear un objeto determinado con su propio cuerpo. Un robot no redundante de tipo $n < m$ según (2a) no podrá envolver a ningún objeto utilizando su estructura (Figura 3a). Un robot no redundante de tipo $m = n$, atendiendo también a (2a), tiene el mínimo número de GdL para posicionar y orientar su extremo adecuadamente, y teóricamente será capaz de alcanzar su base con su extremo pudiendo agarrar un objeto, pero entonces su manipulabilidad se verá reducida (Figura 3b). A medida que aumente el número de GdL, el robot será redundante según (2b) y podrá encerrar un objeto con una mayor manipulabilidad, aunque todavía siendo incapaz de posicionar y orientar dicho objeto adecuadamente (Figura 3c). Solo un robot hiper-redundante, de acuerdo a (2c) será capaz de agarrar un objeto con su propio

cuerpo y, además, posicionarlo y orientarlo de cualquier manera dentro de su espacio de trabajo (Figura 3d).

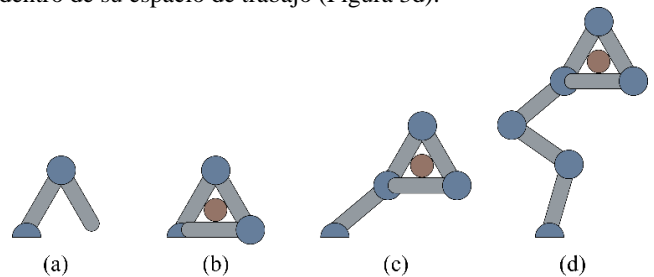


Figura 3: Representación en alzado de diferentes tipos de robots con articulaciones rotacionales en función de su número de GdL en un espacio tridimensional ($m=3$). (a) Robot no redundante de tipo $n < m$. (b) Robot no redundante de tipo $n = m$. (c) Robot redundante de tipo $n > m$. (d) Robot hiper-redundante de tipo $n = 2m$.

Por otro lado, también se dice que un robot hiper-redundante es tolerante a fallos. Si un robot tiene un número de GdL ligeramente superior al indicado en (1), entonces dicho robot será capaz de soportar algún fallo en alguna de sus articulaciones. Sin embargo, si el número de GdL no funcionales excede al número de GdL redundantes, entonces el robot perderá parte de su funcionalidad, convirtiéndose en un robot de tipo $n < m$ de acuerdo a (2a). Por lo tanto, y como justificación añadida a la definición anterior, un robot hiper-redundante deberá ser más tolerante a fallos que uno redundante, y por lo tanto deberá ser capaz de funcionar adecuadamente incluso tras el fallo de tantos GdL como aquellos señalados en (1). Es posible observar el número de GdL en función del tipo de robot en la Tabla 1.

Por lo tanto, atendiendo dicha definición, en un espacio bidimensional, se dirá que un robot no es redundante si tiene hasta 3 GdL, redundante si tiene más de 3 GdL e hiper-redundante si tiene un número mayor o igual a 6 GdL. De la misma manera, en un espacio tridimensional, un robot no redundante tendrá hasta 6 GdL, un robot redundante tendrá más de 6 GdL y un robot hiper-redundante un número igual o mayor a 12 GdL (Figura 2).

Tabla 1: Propiedades y capacidades de los diferentes tipos de robots

	No redundante	No redundante subactuado	Hiper-redundante discreto	Hiper-redundante discreto y subactuado	Continuo	Blando
Propiedades						
GdL, n	$n \leq m$	$n < m$	$n \geq m$	$n \geq 2m$	$n = \infty$	$n = \infty$
Actuadores, a	$a = n$	$a < n$	$a = n$	$a < n$	$a \ll n$	$a \ll n$
Material	Rígido	Rígido	Rígido	Rígido	Rígido	Blando
Capacidades						
Precisión	●●●●	●●●●○	●●●●	●●●●○	●●●○	●○○○
Tiempo de ciclo	●●●●	●●●●	●●●○	●●●○	●●●○	●○○○
Capacidad de carga	●●●●	●●●○	●●●○	●●○○	●●○○	●○○○
Adaptabilidad	●○○○	●○○○	●○○○	●●●○	●●●○	●●●●
Interacción segura	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●○○○	●●●●

2.3. Según el número de articulaciones

En el apartado anterior se han clasificado los robots hiper-redundantes en función del número de GdL. Conviene diferenciar que el concepto de GdL es diferente al de articulación. Una articulación es una unión entre dos elementos que permite el movimiento relativo entre ellos. Y, por lo tanto, puede albergar uno o más GdL. De acuerdo al número de articulaciones, se podrá distinguir entre robots discretos y robots continuos.

Los primeros son mecanismos contruidos mediante una serie de eslabones rígidos distinguibles entre sí (Figura 2), como por ejemplo, el presentado en (Brown, Schwerin et al. 2007).

Los robots continuos, sin embargo, no están formados por eslabones rígidos o identificables, sino que son estructuras que se deforman de manera continua debido a las propiedades elásticas de las mismas. Un ejemplo de robot continuo es (Mehling, Diftler et al. 2006). En este tipo de robots, un único actuador puede ser causante de un movimiento alrededor de varios o infinitos ejes. Por este motivo, y como se señalará en el siguiente apartado, todos los robots continuos son subactuados. También merece la pena destacar que no todos los robots continuos son blandos, sino que también existen robots continuos y rígidos. Sin embargo, como se verá, todos los robots blandos sí que son continuos (Figura 2).

Otros autores incluyen en la clasificación los robots hiper-redundantes serpentinos (Robinson and Davies 1999). Un tipo de manipulador discreto, pero con un número muy elevado de eslabones rígidos y cortos. No se incluyen en la clasificación propuesta, pero se podría decir que se encuentran en una zona próxima al punto de tangencia entre el conjunto de robots discretos y continuos.

2.4. Según su actuación

Los actuadores son el conjunto de dispositivos capaces de transformar la energía en la activación de un movimiento a partir de las órdenes dadas por una unidad de control. Entre los actuadores más usados en robótica hiper-redundante caben destacar: motores (Wolf, Brown et al. 2003), actuadores hidráulicos (Ning and Wörgötter 2009), aleaciones con memoria de forma o SMA, por sus siglas en inglés (Sujan, Lichter et al. 2001), piezoeléctricos (Ikuta, Nokata et al. 1994), músculos artificiales (Wingert, Lichter et al. 2002) o mediante actuadores neumáticos (Shepherd, Ilievski et al. 2011). Es posible encontrar una comparación de estas formas de actuación en (Hunter, Hollerbach et al. 1991).

En función del número de actuadores, se puede distinguir entre robots no subactuados y robots subactuados. Sea $\bar{w} \in \mathfrak{R}^a$ el espacio que define la actuación de un robot, se dirá que es no subactuado si cada actuador es responsable del movimiento de un único GdL en el robot de acuerdo a (3a) (Tabla 1). Sin embargo, en los robots subactuados habitualmente existe un menor número

de actuadores que de GdL y, por lo tanto, puede haber un único actuador responsable del movimiento de varios GdL tal y como se define en (3b) (Tabla 1). Formalmente, los robots subactuados serán aquellos sistemas mecánicos que no pueden ser controlados para seguir una trayectoria arbitraria en el espacio de las configuraciones (Tedrake 2009). Así, los robots anteriormente definidos como continuos son necesariamente subactuados, ya que poseen un número infinito de GdL y no es físicamente posible gobernarlos todos mediante un infinito número de actuadores. De la misma manera, también es posible encontrar redundancia en el número de actuadores, comúnmente en robots paralelos (Sánchez-Alonso, González-Barbosa et al. 2016).

$$\text{No subactuado: } (a = \dim(\bar{w})) = (\dim(\bar{q}) = n) \tag{3a}$$

$$\text{Subactuado: } (a = \dim(\bar{w})) < (\dim(\bar{q}) = n) \tag{3b}$$

En función de la localización de los actuadores con respecto al GdL que controlan, se podrá hablar de actuación intrínseca o distribuida, en los casos en los que la actuación se encuentra dentro del propio mecanismo, o bien extrínseca o remota, para los casos en los que el movimiento se transfiere desde una ubicación externa. Puede considerarse también un tercer tipo de actuación llamada híbrida, para los casos que combinen los dos anteriores tipos de actuación (Robinson and Davies 1999).

Un robot con actuación intrínseca suele ser más preciso, pero más pesado. El peso del robot es muy importante en la robótica en general, y más aún en la robótica hiper-redundante ya que habitualmente son de mayor longitud que los robots convencionales. Un robot con actuación extrínseca es menos pesado y es más fácil de miniaturizar, pero puede presentar problemas de portabilidad y dificultades en su control.

2.5. Según sus materiales

En función de los materiales que los conforman se podrán definir los robots como rígidos o blandos (Grissom, Chitrakaran et al. 2006, Neppalli, Csencsits et al. 2009) aunque, al igual que otras clasificaciones, se puede hablar de robots semiblandos o semirrígidos en las zonas adyacentes al punto de tangencia que separa ambos conjuntos (Figura 2). En ingeniería, la rigidez es una propiedad de un material, componente o sistema estructural que caracteriza la dificultad para deformarlo. Sin embargo, en la práctica, se dice que un robot es rígido o blando en base a esta propiedad, si es relacionada con la adaptabilidad y la seguridad de interacción con su entorno.

Según algunos autores (Majidi 2014), el Módulo de Young (E) puede ser un parámetro útil, aunque limitado, para definir la adaptabilidad de un robot con su entorno. De acuerdo a este trabajo, se podría decir que, de forma aproximada, los robots rígidos podrían tener materiales con un módulo de Young de más de 10^9 N/m^2 y los robots blandos de 10^2 a 10^6 N/m^2 .

Tabla 2: Modelos más representativos de robots hiper-redundantes en el estado del arte

Nombre	Referencia	Clasificación	GdL	Secciones	Actuación	Material	Aplicación
<i>Woodstock</i>	(Brown, Schwerin et al. 2007)	Discreto	12	6	12 motores intrínsecos	Metal	Búsqueda y rescate
<i>Series II X125</i>	(OC-Robotics 2015)	Discreto	24	12	24 motores extrínsecos	Metal	Soldadura
<i>Elephant Trunk</i>	(Hannan and Walker 2001)	Discreto y subactuado	32	4	8 motores extrínsecos	-	Investigación
<i>Tendril</i>	(Mehling, Diftler et al. 2006)	Continuo	∞	2	4 motores extrínsecos	Metal	Misiones espaciales
<i>ET Arm</i>	(Yang and Zhang 2015)	Continuo	∞	2	6 motores extrínsecos y 6 músculos neumáticos	-	Investigación
-	(Dong, Axinte et al. 2017)	Continuo	∞	12	26 motores extrínsecos	-	Aeromotores
<i>Air-Octor</i>	(McMahan, Jones et al. 2005)	Blando	∞	2	3 motores extrínsecos y 1 actuador neumático	-	Investigación
<i>OctArm V</i>	(Trivedi, Lotfi et al. 2007)	Blando	∞	3	9 músculos neumáticos	-	Búsqueda y rescate
<i>BHA</i>	(Rolf and Steil 2012)	Blando	∞	3	9 actuadores neumáticos	Poliamida	Tareas cooperativas
-	(Calisti, Giorelli et al. 2011)	Blando	∞	1	2 motores extrínsecos	Silicona	Investigación
-	(Laschi, Cianchetti et al. 2012)	Blando	∞	1	96 SMA intrínsecos	-	Investigación

Sin embargo, se trata de una medida limitada ya que formalmente, solo da conocimiento de la elongación de barras prismáticas y homogéneas sujetas a pequeñas deformaciones a través de una carga axial. Por otro lado, la energía absorbida por un material durante un impacto generalmente es medida mediante la dureza Shore, y también da una idea de su propiedad elástica. Esta dureza es adimensional y habitualmente se usan tres escalas, que se solapan entre sí, para medirla: Shore 00, Shore A y Shore D. Atendiendo a la escala Shore 00, se dirá que un material es muy blando o blando si tiene hasta dureza de 75, semiblando si tiene de 75 a 90 o semirrígido si tiene de 90 a 100. Para medir la elasticidad de los materiales rígidos o muy rígidos será necesario hacer uso de las escalas Shore A o Shore D, respectivamente. Atendiendo a la escala Shore D, se dirá que un material es rígido si tiene de 30 a 60 y muy rígido si es superior a 60. Cabe destacar que existe una relación de proporcionalidad lineal entre el módulo de Young y la dureza Shore (Larson 2016). La rigidez o la elasticidad pueden dar conocimiento de la adaptabilidad de un robot con su entorno, pero no aportan mucha información acerca de la seguridad a la hora de interactuar con el mismo.

La seguridad de un robot está relacionada con el daño que podría ocasionar en el caso de colisionar de forma indeseada con un ser humano u otro objeto. Existen numerosos trabajos que estudian este tipo de situaciones (Bicchi and Tonietti 2004, Zinn, Khatib et al. 2004, Echávarri, Ceccarelli et al. 2013). En este contexto, la medida de la rigidez debe ser estudiada conjuntamente con la inercia efectiva del robot. De esta manera, es posible estudiar un índice estándar denominado *Criterio de Lesión Encefálica (CLE, o HIC por sus siglas en inglés)*, que da medida del daño como resultado de producirse un impacto. Así pues, para que un robot se considere como blando, tiene que reunir un parámetro de diseño, es decir, la rigidez de los materiales que lo componen; así como un parámetro de control, la inercia producida por sus movimientos. A este respecto, cabe destacar también la frecuente utilización de pliegues en la estructura de los robots blandos para favorecer un comportamiento elástico a nivel macroscópico atendiendo a la ley de elasticidad de Hooke (Shepherd, Ilievski et al. 2011).

Los robots rígidos habitualmente están dotados de una mayor precisión y capacidad de carga que los robots blandos. Sin embargo, son menos versátiles y seguros frente a una posible colisión. Los robots blandos pueden interactuar en entornos delicados, como el cuerpo humano, sin que supongan un peligro para los mismos. Además, los robots blandos son capaces de deformarse de forma continua. Por lo tanto, los robots blandos constituirán un tipo de robots continuos. Sin embargo, no todos los robots continuos se pueden considerar blandos (Figura 2).

3. Estado del arte

En esta sección se va a realizar una revisión de los robots hiper-redundantes más representativos a lo largo de su historia. Se analizarán y se profundizará en aquellos que han recibido más impacto en la comunidad científica para facilitar comparaciones contrastadas (Tabla 2).

3.1. Robots hiper-redundantes discretos móviles

En este apartado se van a explicar brevemente los modelos más representativos de robots hiper-redundantes móviles, es decir, aquellos con capacidades de locomoción. Uno de los primeros robots de este tipo fue presentado en 1972 por Hirose, llamado *ACM III (Active Cord Mechanism)*. El robot, de 20 GdL actuado mediante servomotores, podía desplazarse de forma ondulante, con movimientos semejantes a los de las serpientes reales. Además, hacía uso de una serie de ruedas pasivas para minimizar la fricción (Hirose and Mori 2004).

Desde entonces, fueron muchos los modelos de robots hiper-redundantes móviles desarrollados, intentando mejorar el modelo de Hirose. Algunos, utilizaron ruedas activas como el *GMD Snake* (Worst and Linnemann 1996), el *GMD Snake 2* (Klaassen and Paap 1999), el *MAKROPlus* (Streich and Adria 2004) o el *Genbu* (Kimura and Hirose 2002).

Otros, optaron por utilizar tracción de tipo oruga, como es el caso de *Moirá* (Osuka and Kitajima 2003), *Kohga* (Kamegawa, Yarnasaki et al. 2004), *Soryu* (Osuka 2004) o el *OmniTread* (Granosik, Hansen et al. 2005).

Por otro lado, también se consiguió el movimiento de locomoción sin la utilización de elementos de tracción, como en el caso del *Amphibot I* (Crespi, Badertscher et al. 2005), *Amphibot II* (Crespi and Ijspeert 2006), *Anna Konda* (Liljebäck, Stavadahl et al. 2006), *Slim Slime* (Ohno and Hirose 2001), *Kulko* (Liljebäck, Pettersen et al. 2012) o el *Unified Snake Robot* (Wright, Buchan et al. 2012).

Otras líneas de desarrollo trabajaron con la integración de patas para mejorar el movimiento en terrenos accidentados, como en el caso de *OmniPede* (Long, Anderson et al. 2002). Más adelante, el *ACM III* evolucionó hasta llegar a una versión industrial: el *ACM-R5*. Estaba provisto de ruedas activas y unas aletas para poder moverse incluso bajo el agua (Yu, Ma et al. 2011).

Se puede consultar información adicional del estado del arte de robots hiper-redundantes móviles en (Transeth, Pettersen et al. 2009, Maity and Majumder 2011, Liljebäck, Pettersen et al. 2012).

3.2. Robots hiper-redundantes discretos manipuladores

Los robots hiper-redundantes manipuladores de tipo discreto han sido inspirados en muchas ocasiones por los análogos de tipo móvil. Es el caso de *Woodstock* (Brown, Schwerin et al. 2007) (Tabla 2), un robot de 12 GdL accionados a través de 6 articulaciones universales distribuidas, que destaca por su capacidad de carga y carácter compacto. Estas, son las características que más destacan frente a los robots anteriores de su género, como el *NEC* (Ikeda and Takanashi 1987) o el *JPL Serpentine Robot* (Paljug, Ohm et al. 1995). *Woodstock* se trata, en realidad, de un robot hiper-redundante manipulador móvil. Su control se realiza remotamente con una red inalámbrica. Cada articulación tiene un rango de rotación de $\pm 50^\circ$, por lo que es capaz de alcanzar una rotación máxima de 300° sobre sí mismo.

Los robots hiper-redundantes discretos han sido, tradicionalmente, la tipología más utilizada desde sus comienzos. Sin embargo, actualmente, las tendencias en la investigación de este tipo de robots es la de modelarlos con un mayor número de eslabones rígidos y cortos. Es decir, el estudio de los robots hiper-redundantes discretos está evolucionando al estudio de robots continuos y blandos.

Algunos ejemplos que marcan estas líneas son robots como los de la empresa *OC Robotics* (Buckingham and Graham 2012). Son denominados habitualmente robots de “estilo continuo” porque, aunque no sean estrictamente continuos, están compuestos por un número muy elevado de eslabones rígidos conectados en serie que permiten que las configuraciones de los mismos sean casi continuas (Walker 2013).

Por ejemplo, el modelo *series II X125* presenta 10 articulaciones, 22 GdL y una capacidad de carga de 5 kg. Es capaz de rotar sobre sí mismo ángulos de hasta 225° . Además, el robot presenta un avanzado control que le permite realizar aplicaciones destinadas a la soldadura (OC-Robotics 2015) (Tabla 2).

3.3. Robots continuos

A finales del siglo 20, la contribución de Gregory S. Chirikjian, investigador en la Universidad de Johns Hopkins, fue fundamental en el desarrollo de robots manipuladores continuos. Propuso una modelización para este tipo de robots según la cual se puede aproximar su forma a una curva (Chirikjian 1994, Chirikjian and Burdick 1995). Esta metodología se comprobó en un manipulador hiper-redundante de 30 GdL, en el que también pudo validar la evasión de obstáculos, diversas formas de locomoción y otros algoritmos de agarre (Chirikjian and Burdick 1993).

Posteriormente, a principios del siglo 21, se produjeron numerosos avances en el diseño y modelado de este tipo de robots gracias a los trabajos del grupo de investigación de Walker, de Clemson University, que realizó un manipulador inspirado en una trompa de elefante (Hannan and Walker 2001) (Tabla 2). Además, estudió los fundamentos teóricos de los robots continuos (Hannan and Walker 2003), y propuso un modelo para aproximarlos a partir de la suposición de que sus secciones se curvan de forma constante (Grissom, Chitrakaran et al. 2006). Este robot también podría ser considerado como hiper-redundante discreto y subactuado.

El hecho que un robot sea continuo, le otorga varias ventajas como la capacidad de ajustarse alrededor de objetos con diferentes morfologías. Sin embargo, los robots continuos presentan un control complejo. Por este motivo, Walker argumentó que combinar elementos continuos, para adaptarse a su entorno; y elementos rígidos, para alcanzar un posicionamiento más preciso; podría ser una buena idea (Cowan and Walker 2013).

Uno de los campos en el que los robots continuos tienen un mayor impacto es en el de la medicina. Por ejemplo, para cirugías mínimamente invasivas (Ikuta, Hasegawa et al. 2003, Nickl, Jörg et al. 2009, Mahvash and Dupont 2011, Ranzani, Gerboni et al. 2015, Sareh, Noh et al. 2015), para endoscopias (Ikuta, Nokata et al. 1994, Slatkin, Burdick et al. 1995, Kwok, Tsoi et al. 2013), o para colonoscopias (Chen, Pham et al. 2009). En los últimos años, se han realizado numerosos esfuerzos de miniaturización para este tipo de robots (Webster III, Romano et al. 2009, Paek, Cho et al. 2015).

Otro ejemplo de robot continuo con gran impacto en la investigación es el realizado por la NASA, llamado *Tendrill*. Se trata de un robot manipulador pensado para tareas mínimamente invasivas en misiones espaciales. Su particularidad se basa en una morfología de gran longitud y pequeño diámetro, con una relación de longitud y anchura de 1:100; frente a otros modelos realizados hasta aquel momento. La mayor inspiración para su diseño fueron los robots realizados para tareas médicas, aunque, dichos modelos no alcanzaban longitudes similares. Está compuesto por dos articulaciones provistas de muelles para realizar movimientos prismáticos, y de un conjunto de cables que permiten su rotación. Los resortes proporcionaban al robot una sujeción pasiva para mantener su estructura y también funcionaban para controlar activamente su flexión. Los cables se conectaban a dos motores mediante poleas para cada articulación, de tal manera que, cuando un tensor se retraía, el otro podía extenderse (Mehling, Diftler et al. 2006) (Tabla 2).

Con el transcurso de los años se investigaron sistemas híbridos, o bien por su forma de actuación como el *ET Arm* (a la vez neumático y mediante tensores) (Yang and Zhang 2015), o bien por sus materiales, en parte blandos y en parte rígidos (Li and Du 2013, Stokes, Shepherd et al. 2014). Esta metodología retoma la idea de Walker de encontrar un equilibrio entre las propiedades de los diferentes tipos de robots. Por ejemplo, el *ET Arm (Elephant Trunk Arm)* se diseñó con el fin de presentar un nuevo sistema de actuación que no fuera ni mediante cables tensores, ni mediante actuadores neumáticos. Estaba compuesto por dos segmentos, cada uno provisto de múltiples estructuras elásticas, una piel artificial y 3 músculos artificiales. Además, tenía una serie de motores en su base que permiten la flexión de sus segmentos alrededor de su eje central permitiendo el movimiento continuo de su estructura (Yang and Zhang 2014) (Tabla 2).

Por otro lado, se diseñaron otros robots continuos sin la utilización de elementos como resortes en su estructura, como en el caso del robot de la Universidad de Nottingham. Fue concebido con el fin de realizar tareas de inspección y reparación en aeromotores. Se trata de un modelo muy flexible y, al igual que el *Tendrill*, presenta una gran excentricidad en su relación de longitud y anchura. Tiene 25 GdL y es capaz de enrollarse en un tambor con el fin de facilitar su navegación en entornos desestructurados. También, posee una cámara en su efector final para permitir intervenciones in-situ. Este robot continuo se trata de un sistema muy compacto. Además, presenta una estructura mecánica innovadora, ya que hace uso de una duplicidad de cables para minimizar el número de actuadores, y de una duplicidad de articulaciones, para permitir grandes ángulos de rotación sobre sí mismo. Para lograr las tareas de mantenimiento, un conjunto de algoritmos de control innovadores permite su navegación y la generación de la trayectoria de su efector final (Dong, Axinte et al. 2017) (Tabla 2).

3.4. Robots blandos

Tras el estudio de los robots continuos, comúnmente realizados a partir de materiales rígidos, se comenzaron a considerar nuevos tipos de materiales flexibles para permitir otro tipo de interacción con el entorno. Estos robots, llamados robots blandos, prometían ventajas frente a los tradicionales como una mayor adaptabilidad, versatilidad y seguridad a la hora de interactuar con ellos.

Unido a este cambio de paradigma, proliferaron otras formas de actuación como la neumática, que hasta aquel momento no había sido muy empleada. Algunos ejemplos de robots que utilizaron este medio de actuación son el *KSI Tentacle Manipulator* (Immega and Antonelli 1995), el *Air-Octor* (McMahan, Jones et al. 2005) o el *OctArm* (Trivedi, Lotfi et al. 2007). También, la empresa Festo consiguió, unos años después, realizar un manipulador industrial con actuación neumática de elevadas prestaciones: el *Bionic Handling Assistant (BHA)* (Rolf and Steil 2012).

El *Air-Octor* presenta una actuación híbrida, ya que está provisto de una cámara central presurizada neumáticamente y de unos sensores externos. Está formado por dos secciones neumáticas que sirven principalmente para dar consistencia al robot y para proporcionarle flexibilidad. Una de las ventajas de este diseño es que libera una gran cantidad de espacio en el centro del manipulador. Este espacio lo aprovecha para el enrutamiento de cables sensores o para acomodar sensores. Dichos cables están dispuestos a 120° entre sí y solo pueden ejercer fuerzas de tracción. La combinación de los tres cables permite rotar la sección del manipulador en cualquier dirección. Esta configuración otorga a cada sección 2 GdL, y su estructura blanda le proporciona un tercer GdL prismático (McMahan, Jones et al. 2011) (Tabla 2).

Por otro lado, el robot *OctArm V*, está provisto de 12 GdL accionados a partir de músculos neumáticos McKibben. Está construido a partir del recubrimiento de un tubo de látex con un doble tejido helicoidal de malla de plástico. Estos actuadores proporcionan una gran relación fuerza-peso, ideal para robots manipuladores blandos.

El *Octarm V* tiene la capacidad de agarrar objetos envolviéndolos con su propia estructura. Es capaz de moverse de manera bastante precisa y es capaz sujetar cargas pesadas. Morfológicamente, está dividido en tres secciones, cada una dotada de dos ejes de rotación y de uno prismático, haciendo un total de 9 GdL (Grissom, Chitrakaran et al. 2006). La longitud de cada sección fue diseñada para que el manipulador pudiera proporcionar una rotación sobre sí mismo de 360°, con el fin de manipular una amplia gama de objetos de diferentes tamaños (Grissom, Chitrakaran et al. 2006).

Además, es capaz de agarrar y manipular objetos con una destreza muy superior al *Air-Octor*. Es un robot muy flexible, elástico y tiene una buena capacidad de carga, pero se trata de un robot complejo de construir y controlar. Sin embargo, el robot *Air-Octor*, tiene un diseño mecánico mucho menos complejo y es más fácil de ser controlado (Neppalli and Jones 2007) (Tabla 2).

Como ya se ha indicado, otro modelo destacable de robot blando es el realizado por Festo, llamado *BHA*. Es accionado neumáticamente y está hecho casi completamente de poliamida, por lo que resulta muy flexible y ligero (alrededor de 1,8 kg de peso). Posee tres segmentos principales, cada uno con tres actuadores neumáticos, una articulación esférica para la muñeca del robot, también accionada por tres actuadores, y una pinza de tres dedos accionada por un actuador neumático. La longitud total

sin elemento terminal es de 0,75m. Cuando los actuadores de los fuelles reciben presión, son capaces de realizar movimientos tanto prismáticos como rotacionales. Cuando los actuadores suministran presión, la longitud del robot puede alcanzar 1,2 m. Además, la configuración del robot se puede extraer mediante la utilización de 12 sensores de longitud. Es capaz de moverse de manera estable así como de soportar cargas pesadas (Rolf and Steil 2012). Está pensado para aplicaciones y tareas de manipulación cooperativas ya que, al ser blando, es un robot seguro para interactuar con él (Mahl, Hildebrandt et al. 2012) (Tabla 2).

Los sistemas neumáticos han demostrado ser un sólido sistema de actuación para los robots hiper-redundantes. Sin embargo, los compresores de aire, necesarios en estos sistemas, tienden a ocupar demasiado espacio. Además son complejos, consumen mucha energía, y tienen elevados costes de fabricación y mantenimiento (Yang and Zhang 2014).

A partir del 2010, proliferó un tipo de robots blandos más livianos con estructuras de fácil reproducibilidad. Es posible encontrar varios de estos ejemplos en (Trivedi, Rahn et al. 2008, Majidi 2014, Rus and Tolley 2015), de los cuales muchos modelos se desarrollaron inspirados en el tentáculo de un pulpo (Calisti, Giorelli et al. 2011, Laschi, Cianchetti et al. 2012, Renda, Cianchetti et al. 2012, Kang, Branson et al. 2013, Martinez, Branch et al. 2013).

Además, la aparición de estos robots ha impulsado el estudio y la aplicación de novedosos métodos de actuación, utilizando materiales que presentan la propiedad de cambiar su rigidez (Cheng, Lobovsky et al. 2012). Entre ellos, destacan *voice coils* o motores de bobina de voz (Seok, Onal et al. 2013, Nemitz, Mihaylov et al. 2016), polímeros electroactivos (Mutlu, Alici et al. 2013), aleaciones con memoria de forma o SMAs (Laschi and Cianchetti 2014), imanes permanentes (Marchese, Onal et al. 2011), redes neumáticas (Mosadegh, Polygerinos et al. 2014) o incluso mediante pequeñas explosiones controladas (Shepherd, Stokes et al. 2013). Además del tentáculo de pulpo, se han utilizado otros modelos biomecánicos basados en rayas de mar (Suzumori, Endo et al. 2007), gusanos (Jung, Koo et al. 2007, Lin, Leisk et al. 2011) y estrellas de mar (Shepherd, Ilievski et al. 2011).

Algunos de los ejemplos más representativos de este tipo de robots blandos son los de la Universidad de Pisa. Uno de ellos, se trata de un manipulador de una estructura de silicona accionada mediante un cable de acero flexible para proporcionar movimientos prismáticos y un cable de nylon para proporcionar capacidades de flexión y agarre. Los dos cables están actuados mediante servomotores. Es capaz de adaptar su forma alrededor de objetos diferentes formas y tamaños (Calisti, Giorelli et al. 2011) (Tabla 2).

Posteriormente, en los últimos años, se intentó mejorar dicho modelo mecánico implementando una nueva forma de actuación. Se trata de un robot blando compuesto por una estructura de fibra de plástico trenzada muy flexible, y actuada mediante un conjunto de SMAs, dispuestos de forma transversal y longitudinal para producir las deformaciones deseadas (Kim, Laschi et al. 2013). Es un prototipo completamente blando capaz de mimetizar perfectamente los movimientos básicos del tentáculo de un pulpo (Laschi, Cianchetti et al. 2012) (Tabla 2) (Figura 1).

4. Problemática

El campo de la robótica hiper-redundante es de gran potencial, pero su aplicación todavía se encuentra en vías de desarrollo y, muchas veces, limitado al ámbito investigador. Se puede observar en la Figura 4 la evolución de los diferentes tipos de robots hiper-redundantes en el ámbito científico en los últimos años. Los robots continuos y especialmente los blandos, han sido objeto de un gran crecimiento en el impacto investigador de la robótica frente a los robots discretos.

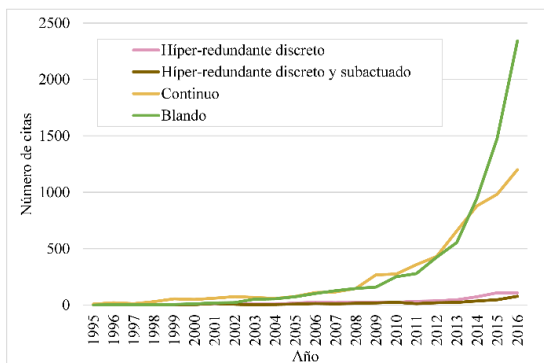


Figura 4: Impacto de investigación de los tipos de robots hiper-redundantes en los últimos años. Fuente: Web of Science.

A continuación, se va a exponer la problemática actual de los robots hiper-redundantes. Esto es, en otras palabras, los mayores retos a los que se enfrenta la investigación de este campo. Entre ellos, destaca la dificultad de ser diseñados, encontrar un modelo fiable de los mismos, controlarlos de forma adecuada y planificar sus movimientos en entornos con obstáculos.

4.1. Diseño mecánico, sensores y fabricación

El diseño mecánico de los robots hiper-redundantes es complejo. A menudo se trata del diseño de un módulo base que se repite secuencialmente a lo largo de su estructura (Marques, Dinis et al. 2009). Este diseño puede permitir la creación de robots hiper-redundantes modulares, reconfigurables y de reparación más fácil que los no modulares en caso de avería. Sin embargo, este tipo de robots están fuertemente condicionados por el tipo de actuación y su localización.

En el caso de los robots continuos, es importante elegir correctamente los elementos estructurales elásticos que van a dar razón del movimiento del mismo. Debido a su naturaleza, se deberán utilizar materiales robustos con largos tiempos de vida funcional. A su vez, se encuentra también el reto de concatenar múltiples secciones continuas para controlar la rigidez de este tipo de robots en función del objetivo. Por otro lado, no siempre es sencillo definir límites en la acción de los actuadores para prevenir colisiones (Webster III and Jones 2010).

En la literatura específica de robots blandos se utiliza mucho la terminología de rigidez variable. Esto es debido a que habitualmente utilizan actuadores continuos de tipo hidráulico o neumático, que permiten ajustar de forma dinámica la rigidez de la estructura para realizar rápidos movimientos, o sujetar con firmeza un objeto rodeándolo con el propio cuerpo del robot. El diseño de estos robots está fuertemente ligado a su morfología, forma de actuación y peso. Por este motivo, tampoco es sencillo definir el tipo de herramienta para el efector final debido al peso que añade a la estructura, que en ocasiones podrá ser compensado mediante estrategias de control más complejas.

En robótica, y en automática en general, la realimentación es un concepto fundamental. La realimentación de un sistema robótico permite realizar controles precisos en lazo cerrado a partir del conocimiento previo de su configuración. Para este fin, el uso de sensores que den información del estado actual del robot es imprescindible. Es importante destacar que en los robots hiper-redundantes, es tan importante conocer la posición y orientación de su extremo, como la del resto de eslabones del robot.

Los *encoders* o generadores de pulsos tradicionales aportan información insuficiente en cualquier tipo de robot subactuado para reconstruir su configuración. Por este motivo, muchos trabajos se han centrado en otros sensores como el uso de cámaras y visión por computador (Croom, Rucker et al. 2010). Sin embargo, este tipo de métodos son únicamente factibles en entornos muy controlados y, por lo tanto, presentan baja portabilidad. En otros trabajos se ha propuesto el uso de unidades de medición inercial (IMU) para resolver este problema (Kang and Park 2016). Otros avances más modernos ofrecen capacidades sensoriales en la propia estructura del robot capaces de extraer la curva que modela su configuración. Un ejemplo de estos sensores es el llamado *fiber Bragg grating (FBG)*, basado en fibra óptica (Larkin and Shafer 2011), de gran precisión pero de coste elevado. Los sensores también pueden ser usados para medir las capacidades de fuerza intrínsecas al robot, o para su calibración, permitiendo el ajuste de parámetros como la rigidez o la longitud a la información experimental (Xu and Simaan 2008, Webster III, Romano et al. 2009).

Los robots hiper-redundantes están formados por un elevado número de articulaciones. Por este motivo, el proceso productivo de los mismos también suele ser difícil y laborioso. Además, un elevado número de articulaciones generalmente también implica un elevado número de actuadores, sensores, elementos de transmisión, controladores y otros elementos que elevan su coste económico. Los robots blandos, en este sentido, son una excepción. Sus estructuras habitualmente pueden ser producidas mediante moldeo de una forma rápida y de bajo coste (Shepherd, Ilievski et al. 2011, Wehner, Truby et al. 2016).

4.2. Modelado

El modelado de los robots permite la extracción teórica del comportamiento del mismo en un entorno o aplicación dados, para poder aplicar sobre los mismos una acción de control. En muchas ocasiones, sin dicho modelo, no será posible realizar un control preciso o fiable sobre el robot en cuestión. Los robots hiper-redundantes rígidos no plantean grandes problemas en este respecto, ya que las técnicas clásicas de modelado de robots convencionales pueden ser habitualmente extendidas a un mayor número de articulaciones. Sin embargo, los robots continuos con frecuencia presentan un elevado número de no linealidades que dificultan esa extracción de su comportamiento. Podremos distinguir, a este respecto, diferentes formas de modelado estático y modelado dinámico.

En el primer caso, el modelo de los robots continuos muchas veces se basa a partir de una aproximación que lo estudia como un conjunto de secciones de curvatura constante (Webster III and Jones 2010). Sin embargo, esta metodología no permite demostrar que la calidad en el ajuste de las secciones de forma independiente pueda ser extrapolable a la del robot en su conjunto. Por otro lado, existe otra vertiente que trata de extraer el modelo de robots continuos en términos teóricos básicos como son la elasticidad y minimización de energía (Rucker, Webster III et al. 2010) o el modelo de cuerdas de Cosserat (Trivedi, Lotfi et al. 2008). Dichos

modelos han sido particularmente eficientes a la hora de incluir los efectos de la gravedad, torsiones y capacidades de carga frente a las técnicas anteriores. Cabe destacar un trabajo capaz de modelar elementos continuos y biológicos en estructuras discretas y telescópicas (Yu, Crane et al. 2017).

En el caso del modelado dinámico, las ecuaciones de los robots continuos han sido desarrolladas en (Gravagne, Rahn et al. 2003, Tatlicioglu, Walker et al. 2007) y, en su mayor parte, implementadas en base al trabajo (Chirikjian 1994), donde se proporcionó un método para calcular la dinámica de un robot continuo planar de forma eficiente a partir de una estructura de geometría variable habitualmente denominada *backbone curve*. Sin embargo, este tipo de métodos se basan en la suposición de una curvatura constante que solo es válida cuando no se tiene en cuenta el propio peso del robot y además no existen cargas externas en el manipulador. Dichas propiedades pueden producir desviaciones en el modelo de curvatura constante, dando lugar a errores de posicionamiento. Sin embargo, trabajos más recientes han subsanado dichas limitaciones (Tatlicioglu, Walker et al. 2007). Se espera que las próximas investigaciones faciliten el modelado dinámico de este tipo de robots para aplicaciones en tiempo real de una forma precisa.

En el caso de los robots blandos, como un tipo de robots continuos, el desarrollo de modelos precisos y eficientes también requiere de un estudio más profundo debido a las no linealidades intrínsecas de sus morfologías y materiales. Algunos de estos estudios se centran en modelos biomecánicos como tentáculos de calamares (Van Leeuwen and Kier 1997), pulpos (Yekutieli, Sagiv-Zohar et al. 2005, Laschi, Cianchetti et al. 2012) o trompas de elefantes (Wilson, Li et al. 1993).

De acuerdo con algunos autores, los modelos que aproximan manipuladores continuos mediante robots hiper-redundantes discretos pueden también ser apropiados (Trivedi, Rahn et al. 2008, Martín, Barrientos et al. 2018). Otros modelos de gran precisión han sido desarrollados a partir del *método de los elementos finitos* (FEM, en inglés) que a menudo permiten su aplicación en tiempo real (Duriez 2013). Sin embargo, la extracción de modelos precisos en la robótica blanda todavía requiere de una mayor profundización.

4.3. Control

Las técnicas clásicas empleadas para el análisis o control cinemático de robots convencionales no han sido eficientes o bien adaptadas a las necesidades de los robots hiper-redundantes. La cinemática directa de los robots hiper-redundantes discretos no tiene una gran complicación, pero sí lo tiene la determinación de su cinemática inversa. Este problema trata de obtener los valores articulares que consiguen posicionar y orientar el extremo de un robot de una forma determinada. Un manipulador hiper-redundante puede alcanzar con su extremo una localización espacial (posición y orientación) mediante un infinito número de diferentes configuraciones articulares (Konkur and Buckingham 1997). Escoger la solución más adecuada de entre todas ellas puede ser un gran reto. Para su resolución en el caso de robots hiper-redundantes discretos, algunos autores han propuesto técnicas como la *matriz Jacobiana pseudoinversa* (Marques, Dinis et al. 2009), *pattern search*, *global search*, *algoritmos genéticos*, *recocido simulado* o *redes neuronales* (Espinoza, Goncalves et al. 2012), entre otras.

En el caso de los robots continuos, y particularmente para los robots blandos, el control cinemático es complicado ya que ambos poseen un número virtualmente infinito de GdL. En estos casos, un control preciso requiere de una predicción basada en modelos elásticos que, también de forma precisa, describan su forma a

escala macroscópica. El control basado en modelos más simples no garantiza una gran estabilidad o efectividad (Gravagne, Rahn et al. 2001). Además, cabe destacar que, en este tipo de robots, no siempre basta con controlar el efector final, sino el cuerpo completo. Acerca de esto, existe una gran falta de interfaces optimizadas para su control y teleoperación.

Para simplificar la cinemática inversa de estos robots, algunos autores propusieron la discretización del espacio de la configuración de un manipulador de dimensión infinita a un espacio de dimensión finita mediante la descomposición de *wavelets* (Gravagne and Walker 2000). También utilizaron elipsoides de fuerza y manipulabilidad para analizar estas capacidades en los robots de tipo blando (Gravagne and Walker 2001). Algunas técnicas de control de robots hiper-redundantes que cabe destacar son de tipo *PD con prealimentación* (Gravagne and Walker 2002), basados en *redes neuronales* (Braganza, Dawson et al. 2006), mediante reguladores borrosos (Ivanescu 2002), otros basados en modelos dinámicos de grandes deflexiones para robots continuos (Gravagne, Rahn et al. 2003) u otros adaptados para la dinámica de robots blandos (Yekutieli, Sagiv-Zohar et al. 2005).

4.4. Planificación de movimientos

Otro campo de gran importancia en la robótica es el de la planificación de movimientos. Considera a un robot en un entorno con obstáculos que debe gestionar con el fin de moverse evitando cualquier posible colisión. Las técnicas tradicionales habitualmente hacen uso de herramientas como el espacio-C, también conocido como espacio articular o de configuración (Lozano-Perez 1983, Dasgupta, Gupta et al. 2009). Sin embargo, en el caso de los robots hiper-redundantes, el espacio articular es de dimensión muy grande, por lo que el coste computacional de esos métodos es inviable. Por este motivo, en el caso de los robots hiper-redundantes discretos, este problema se ha intentado resolver mediante otras técnicas como *diagramas de Voronoi* (Shkolnik and Tedrake 2009), mediante métodos geométricos (Yahya, Moghavvemi et al. 2009), algoritmos basados en *RRT* (Lee, Koo et al. 2015), o mediante *optimización de enjambre de partículas* (Taherifar, Alasty et al. 2013, Collins and Shen 2016).

Las técnicas de planificación de movimientos para los robots continuos sufren de grandes limitaciones que dificultan su uso práctico en la actualidad. Existen varios ejemplos de trabajos en esta área, con un énfasis especial en el ámbito médico, de entre los cuales destacan un elevado coste computacional que, en muchas ocasiones, impide su realización en aplicaciones de tiempo real (Lyons, Webster et al. 2009).

Los métodos probabilísticos habitualmente tienen un alto coste computacional porque requieren de la generación de puntos en el espacio de la configuración, que crece exponencialmente con el número de GdL. Además, los métodos experimentados hasta la fecha no tienen en cuenta las restricciones de las propiedades físicas de los robots. Así, la mayoría de los planificadores solo funcionan en casos muy específicos y no para robots flexibles en general. Entre los planificadores más utilizados para robots blandos destacan métodos como el *PRM* (Lamiroux and Kavraki 2001) o *algoritmos genéticos* (Conru 1994), entre otros.

5. Conclusiones

En este documento se han analizado los robots hiper-redundantes debido a sus ventajas frente a los robots convencionales. Son más hábiles a la hora de evadir obstáculos en entornos complejos, son tolerantes a fallos y ofrecen

ventajas cinemáticas. Sin embargo, son percibidos como innecesariamente complejos y las técnicas de control cinemático y de planificación de movimientos clásicas no han sido adecuadamente adaptadas a sus necesidades. La clasificación de este tipo de robots no resulta trivial ya que muchos modelos presentan características difusas entre varias categorías. Sin embargo, en este trabajo se ha propuesto una nueva clasificación según su funcionalidad, el número de grados de libertad y de articulaciones, la forma y la localización de su actuación y los materiales que los conforman. De esta manera, se pretende clarificar y completar las existentes en la literatura científica para dar lugar a este tipo de robots. De forma añadida, se ha realizado una revisión y posterior análisis del estado del arte de los robots hiper-redundantes, así como de sus principales problemáticas junto con las metodologías más recientes utilizadas para resolverlas. De esta manera, este trabajo pretende servir de guía para adentrarse en este campo de tanto potencial.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado de las actividades de investigación llevadas a cabo en el Centro de Automática y Robótica (CAR-UPM-CSIC) de la Universidad Politécnica de Madrid (España), en el seno del grupo de investigación de Robótica y Cibernética (RobCib). Las actividades se enmarcan en los proyectos RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Fase III; S2013/MIT-2748) y en el proyecto DPI2014-56985-R (Protección Robotizada de Infraestructuras Críticas) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Referencias

- Barrientos, A. (2007). Fundamentos de robótica, e-libro, Corp.
- Bernal, J., R. Flowers-Cano and A. Carbajal-Dominguez (2009). "Exact calculation of the number of degrees of freedom of a rigid body composed of n particles." *Revista mexicana de física E* 55(2): 191-195.
- Bicchi, A. and G. Tonietti (2004). "Fast and" soft-arm" tactics [robot arm design]." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 11(2): 22-33.
- Braganza, D., D. Dawson, I. Walker and N. Nath (2006). Neural network grasping controller for continuum robots. *Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on, IEEE*.
- Brown, H. B., M. Schwerin, E. Shamma and H. Choset (2007). Design and control of a second-generation hyper-redundant mechanism. *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE*.
- Buckingham, R. and A. Graham (2012). "Nuclear snake-arm robots." *Industrial Robot: An International Journal* 39(1): 6-11.
- Calisti, M., M. Giorelli, G. Levy, B. Mazzolai, B. Hochner, C. Laschi and P. Dario (2011). "An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots." *Bioinspiration & biomimetics* 6(3): 036002.
- Collins, T. and W.-M. Shen (2016). "PASO: An Integrated, Scalable PSO-based Optimization Framework for Hyper-Redundant Manipulator Path Planning and Inverse Kinematics."
- Conkur, E. S. and R. Buckingham (1997). "Clarifying the definition of redundancy as used in robotics." *Robotica* 15(5): 583-586.
- Conru, A. B. (1994). A genetic approach to the cable harness routing problem. *Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on, IEEE*.
- Cowan, L. S. and I. D. Walker (2013). "The importance of continuous and discrete elements in continuum robots." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10(3): 165.
- Crespi, A., A. Badertscher, A. Guignard and A. J. Ijspeert (2005). "AmphiBot I: an amphibious snake-like robot." *Robotics and Autonomous Systems* 50(4): 163-175.
- Crespi, A. and A. J. Ijspeert (2006). AmphiBot II: An amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator. *Proceedings of the 9th international conference on climbing and walking robots (CLAWAR 2006)*.
- Croom, J. M., D. C. Rucker, J. M. Romano and R. J. Webster (2010). Visual sensing of continuum robot shape using self-organizing maps. *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, IEEE*.
- Chen, G., M. T. Pham and T. Redarce (2009). "Sensor-based guidance control of a continuum robot for a semi-autonomous colonoscopy." *Robotics and autonomous systems* 57(6): 712-722.
- Cheng, N. G., M. B. Lobovsky, S. J. Keating, A. M. Setapen, K. I. Gero, A. E. Hosoi and K. D. Iagnemma (2012). Design and analysis of a robust, low-cost, highly articulated manipulator enabled by jamming of granular media. *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, IEEE*.
- Chirikjian, G. S. (1992). Theory and applications of hyper-redundant robotic manipulators. California Institute of Technology.
- Chirikjian, G. S. (1994). "Hyper-redundant manipulator dynamics: A continuum approximation." *Advanced Robotics* 9(3): 217-243.
- Chirikjian, G. S. and J. W. Burdick (1993). Design and Experiments with a 30 DOF Robot. *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on, IEEE*.
- Chirikjian, G. S. and J. W. Burdick (1994). "A hyper-redundant manipulator." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 1(4): 22-29.
- Chirikjian, G. S. and J. W. Burdick (1995). "Kinematically optimal hyper-redundant manipulator configurations." *IEEE transactions on Robotics and Automation* 11(6): 794-806.
- Dasgupta, B., A. Gupta and E. Singla (2009). "A variational approach to path planning for hyper-redundant manipulators." *Robotics and Autonomous Systems* 57(2): 194-201.
- Dong, X., D. Axinte, D. Palmer, S. Cobos, M. Raffles, A. Rabani and J. Kell (2017). "Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 44: 218-229.
- Duriez, C. (2013). Control of elastic soft robots based on real-time finite element method. *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, IEEE*.
- Echavarrí, J., M. Ceccarelli, G. Carbone, C. Alén, J. L. Muñoz, A. Díaz and J. M. Muñoz-Guijosa (2013). "Towards a safety index for assessing head injury potential in service robotics." *Advanced Robotics* 27(11): 831-844.
- Espinoza, M. S., J. Goncalves, P. Leitao, J. L. G. Sanchez and A. Herreros (2012). Inverse Kinematics of a 10 DOF Modular Hyper-Redundant Robot Resorting to Exhaustive and Error-Optimization Methods: A Comparative Study. *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian, IEEE*.
- Gonzalez, D. J. (2014). A low-cost, high-strength, open-source, rapid prototype underactuated robot gripper, Massachusetts Institute of Technology.
- Granosik, G., M. G. Hansen and J. Borenstein (2005). "The OmniTread serpentine robot for industrial inspection and surveillance." *Industrial Robot: An International Journal* 32(2): 139-148.
- Gravagne, I. A., C. D. Rahn and I. D. Walker (2001). Good vibrations: a vibration damping setpoint controller for continuum robots. *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, IEEE*.
- Gravagne, I. A., C. D. Rahn and I. D. Walker (2003). "Large deflection dynamics and control for planar continuum robots." *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 8(2): 299-307.
- Gravagne, I. A. and I. D. Walker (2000). Kinematic transformations for remotely-actuated planar continuum robots. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on, IEEE*.
- Gravagne, I. A. and I. D. Walker (2001). Manipulability and force ellipsoids for continuum robot manipulators. *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE*.
- Gravagne, I. A. and I. D. Walker (2002). Uniform regulation of a multi-section continuum manipulator. *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, IEEE*.
- Grisson, M. D., V. Chitrakaran, D. Dienno, M. Csencits, M. Pritts, B. Jones, W. McMahan, D. Dawson, C. Rahn and I. Walker (2006). Design and experimental testing of the OctArm soft robot manipulator. *Unmanned Systems Technology VIII, International Society for Optics and Photonics*.
- Hannan, M. and I. Walker (2001). The elephant trunk manipulator, design and implementation. *Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/ASME International Conference on, IEEE*.
- Hannan, M. W. and I. D. Walker (2003). "Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots." *Journal of Field Robotics* 20(2): 45-63.

- Hirose, S. and M. Mori (2004). Biologically inspired snake-like robots. Robotics and Biomimetics, 2004. ROBIO 2004. IEEE International Conference on, IEEE.
- Hunter, I. W., J. M. Hollerbach and J. Ballantyne (1991). "A comparative analysis of actuator technologies for robotics." Robotics Review 2: 299-342.
- Ikeda, H. and N. Takashashi (1987). Joint assembly movable like a human arm, Google Patents.
- Ikuta, K., T. Hasegawa and S. Daifu (2003). Hyper redundant miniature manipulator "Hyper Finger" for remote minimally invasive surgery in deep area. Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on, IEEE.
- Ikuta, K., M. Nokata and S. Aritomi (1994). Biomedical micro robots driven by miniature cybernetic actuator. Micro Electro Mechanical Systems, 1994, MEMS'94, Proceedings, IEEE Workshop on, IEEE.
- Immega, G. and K. Antonelli (1995). The KSI tentacle manipulator. Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on, IEEE.
- Ivanescu, M. (2002). Position dynamic control for a tentacle manipulator. Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, IEEE.
- Jung, K., J. C. Koo, Y. K. Lee and H. R. Choi (2007). "Artificial annelid robot driven by soft actuators." Bioinspiration & biomimetics 2(2): S42.
- Kamegawa, T., T. Yarnasaki, H. Igarashi and F. Matsuno (2004). Development of the snake-like rescue robot "kohga". Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on, IEEE.
- Kang, B.-S. and E. J. Park (2016). Modeling and control of an intrinsic continuum robot actuated by pneumatic artificial muscles. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016 IEEE International Conference on, IEEE.
- Kang, R., D. T. Branson, T. Zheng, E. Guglielmino and D. G. Caldwell (2013). "Design, modeling and control of a pneumatically actuated manipulator inspired by biological continuum structures." Bioinspiration & biomimetics 8(3): 036008.
- Kim, S., C. Laschi and B. Trimmer (2013). "Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics." Trends in biotechnology 31(5): 287-294.
- Kimura, H. and S. Hirose (2002). Development of Genbu: Active wheel passive joint articulated mobile robot. Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Kimura, S., M. Takahashi, T. Okuyama, S. Tsuchiya and Y. Suzuki (1998). "A fault-tolerant control algorithm having a decentralized autonomous architecture for space hyper-redundant manipulators." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans 28(4): 521-527.
- Klaassen, B. and K. L. Paap (1999). GMD-SNAKE2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control. Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on, IEEE.
- Kwok, K.-W., K. H. Tsoi, V. Vitiello, J. Clark, G. C. Chow, W. Luk and G.-Z. Yang (2013). "Dimensionality reduction in controlling articulated snake robot for endoscopy under dynamic active constraints." IEEE Transactions on Robotics 29(1): 15-31.
- Lamiroux, F. and L. E. Kavraki (2001). "Planning paths for elastic objects under manipulation constraints." The International Journal of Robotics Research 20(3): 188-208.
- Larkin, D. Q. and D. C. Shafer (2011). Robotic surgery system including position sensors using fiber bragg gratings, Google Patents.
- Larson, K. (2016). "Can You Estimate Modulus From Durometer Hardness for Silicones." Dow Corning Corporation.
- Laschi, C. and M. Cianchetti (2014). "Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control." Frontiers in bioengineering and biotechnology 2.
- Laschi, C., M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador and P. Dario (2012). "Soft robot arm inspired by the octopus." Advanced Robotics 26(7): 709-727.
- Lee, K., J. C. Koo, H. R. Choi and H. Moon (2015). An RRT* path planning for kinematically constrained hyper-redundant inpipe robot. Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2015 12th International Conference on, IEEE.
- Li, Z. and R. Du (2013). "Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot." International Journal of Advanced Robotic Systems 10(4): 209.
- Liljeback, P., K. Y. Pettersen, Ø. Stavadahl and J. T. Gravdahl (2012). "Snake robot locomotion in environments with obstacles." IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 17(6): 1158-1169.
- Liljeback, P., K. Y. Pettersen, Ø. Stavadahl and J. T. Gravdahl (2012). "A review on modelling, implementation, and control of snake robots." Robotics and Autonomous Systems 60(1): 29-40.
- Liljeback, P., O. Stavadahl and A. Beitnes (2006). SnakeFighter-development of a water hydraulic fire fighting snake robot. Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV'06. 9th International Conference on, IEEE.
- Lin, H.-T., G. G. Leisk and B. Trimmer (2011). "GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot." Bioinspiration & biomimetics 6(2): 026007.
- Long, G., J. Anderson and J. Borenstein (2002). The kinematic design of the omnipede: a new approach to obstacle traversal. Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on, IEEE.
- Lozano-Perez, T. (1983). "Spatial planning: A configuration space approach." IEEE transactions on computers 100(2): 108-120.
- Lyons, L. A., R. J. Webster and R. Alterovitz (2009). Motion planning for active cannulas. Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Mahl, T., A. Hildebrandt and O. Sawodny (2012). Forward kinematics of a compliant pneumatically actuated redundant manipulator. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012 7th IEEE Conference on, IEEE.
- Mahvash, M. and P. E. Dupont (2011). "Stiffness control of surgical continuum manipulators." IEEE Transactions on Robotics 27(2): 334-345.
- Maity, A. and S. Majumder (2011). Serpentine robots: A study of design philosophy. Advanced Robotics (ICAR), 2011 15th International Conference on, IEEE.
- Majidi, C. (2014). "Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future." Soft Robotics 1(1): 5-11.
- Marchese, A. D., C. D. Onal and D. Rus (2011). Soft robot actuators using energy-efficient valves controlled by electropermanent magnets. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Marques, L., J. Dinis, A. P. Coimbra, M. M. Crisóstomo and J. P. Ferreira (2009). 3D hyper-redundant robot. 11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering, Zaragoza, Spain.
- Martín, A., A. Barrientos and J. del Cerro (2018). "The Natural-CCD algorithm: A novel method to control hyper-redundant and soft robots." Soft Robotics.
- Martinez, R. V., J. L. Branch, C. R. Fish, L. Jin, R. F. Shepherd, R. Nunes, Z. Suo and G. M. Whitesides (2013). "Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers." Advanced Materials 25(2): 205-212.
- McMahan, W., B. Jones, I. Walker, V. Chitrakaran, A. Seshadri and D. Dawson (2011). "Robotic manipulators inspired by cephalopod limbs." Proceedings of the Canadian Engineering Education Association.
- McMahan, W., B. A. Jones and I. D. Walker (2005). Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-Octor. Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Mehling, J. S., M. A. Diffler, M. Chu and M. Valvo (2006). A minimally invasive tendril robot for in-space inspection. Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on, IEEE.
- Mosadegh, B., P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. F. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C. J. Walsh and G. M. Whitesides (2014). "Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly." Advanced Functional Materials 24(15): 2163-2170.
- Mutlu, R., G. Alici and W. Li (2013). "An effective methodology to solve inverse kinematics of electroactive polymer actuators modelled as active and soft robotic structures." Mechanism and Machine Theory 67: 94-110.
- Nemitz, M. P., P. Mihaylov, T. W. Barraclough, D. Ross and A. A. Stokes (2016). "Using voice coils to actuate modular soft robots: wormbot, an example." Soft robotics 3(4): 198-204.
- Neppalli, S., M. A. Csencsits, B. A. Jones and I. D. Walker (2009). "Closed-form inverse kinematics for continuum manipulators." Advanced Robotics 23(15): 2077-2091.
- Neppalli, S. and B. A. Jones (2007). Design, construction, and analysis of a continuum robot. Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Nickl, M., S. Jörg and G. Hirzinger (2009). "The virtual path: The domain model for the design of the MIRO surgical robotic system." IFAC Proceedings Volumes 42(16): 1-7.
- Ning, K. and F. Wörgötter (2009). "A novel concept for building a hyper-redundant chain robot." IEEE transactions on robotics 25(6): 1237-1248.
- OC-Robotics. (2015). "Series II, X125 System." Retrieved October 2017.
- Ohno, H. and S. Hirose (2001). Design of slim slime robot and its gait of locomotion. Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Osuka, K. (2004). On Development of Snake-like Robots to Search a Victim Left inside Debris. Robotics and Biomimetics, 2004. ROBIO 2004. IEEE International Conference on, IEEE.

- Osuka, K. and H. Kitajima (2003). Development of mobile inspection robot for rescue activities: MOIRA. Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Paek, J., I. Cho and J. Kim (2015). "Microbotic tentacles with spiral bending capability based on shape-engineered elastomeric microtubes." *Scientific reports* 5: 10768.
- Paljug, E., T. Ohm and S. Hayati (1995). The JPL serpentine robot: a 12-DOF system for inspection. Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on, IEEE.
- Ranzani, T., G. Gerboni, M. Cianchetti and A. Menciassi (2015). "A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery." *Bioinspiration & biomimetics* 10(3): 035008.
- Renda, F., M. Cianchetti, M. Giorelli, A. Arienti and C. Laschi (2012). "A 3D steady-state model of a tendon-driven continuum soft manipulator inspired by the octopus arm." *Bioinspiration & biomimetics* 7(2): 025006.
- Robinson, G. and J. B. C. Davies (1999). Continuum robots-a state of the art. Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on, IEEE.
- Rolf, M. and J. J. Steil (2012). Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the Bionic Handling Assistant. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Rothling, F., R. Haschke, J. J. Steil and H. Ritter (2007). Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-dof shadow and 9-dof tum hand. Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Rucker, D. C., R. J. Webster III, G. S. Chirikjian and N. J. Cowan (2010). "Equilibrium conformations of concentric-tube continuum robots." *The International journal of robotics research* 29(10): 1263-1280.
- Rus, D. and M. T. Tolley (2015). "Design, fabrication and control of soft robots." *Nature* 521(7553): 467.
- Sánchez-Alonso, R. E., J.-J. González-Barbosa, E. Castillo-Castañeda and M. A. García-Murillo (2016). "Análisis cinemático de un novedoso robot paralelo reconfigurable." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 13(2): 247-257.
- Sareh, S., Y. Noh, T. Ranzani, H. Wurdemann, H. Liu and K. Althoefer (2015). A 7.5 mm Steiner chain fibre-optic system for multi-segment flex sensing. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Selic, M., A. Reekers and A. Steinacker (2001). Robot arm, Google Patents.
- Seok, S., C. D. Onal, K.-J. Cho, R. J. Wood, D. Rus and S. Kim (2013). "Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators." *IEEE/ASME Transactions on mechatronics* 18(5): 1485-1497.
- Shepherd, R. F., F. Ilievski, W. Choi, S. A. Morin, A. A. Stokes, A. D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang and G. M. Whitesides (2011). "Multigait soft robot." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(51): 20400-20403.
- Shepherd, R. F., A. A. Stokes, J. Freake, J. Barber, P. W. Snyder, A. D. Mazzeo, L. Cademartiri, S. A. Morin and G. M. Whitesides (2013). "Using explosions to power a soft robot." *Angewandte Chemie* 125(10): 2964-2968.
- Shkolnik, A. and R. Tedrake (2009). Path planning in 1000+ dimensions using a task-space Voronoi bias. Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on, IEEE.
- Slatkin, A. B., J. Burdick and W. Grundfest (1995). The development of a robotic endoscope. Intelligent Robots and Systems 95.'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Stokes, A. A., R. F. Shepherd, S. A. Morin, F. Ilievski and G. M. Whitesides (2014). "A hybrid combining hard and soft robots." *Soft Robotics* 1(1): 70-74.
- Streich, H. and O. Adria (2004). Software approach for the autonomous inspection robot MAKRO. Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on, IEEE.
- Sujan, V. A. and S. Dubowsky (2004). "Design of a lightweight hyper-redundant deployable binary manipulator." *Journal of Mechanical Design* 126(1): 29-39.
- Sujan, V. A., M. D. Lichter and S. Dubowsky (2001). Lightweight hyper-redundant binary elements for planetary exploration robots. *Advanced Intelligent Mechatronics*, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/ASME International Conference on, IEEE.
- Suzumori, K., S. Endo, T. Kanda, N. Kato and H. Suzuki (2007). A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot. Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, IEEE.
- Taherifar, A., A. Alasty, H. Salarieh and M. Boroushaki (2013). Path planning for a hyper-redundant manipulator with lockable joints using PSO. Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on, IEEE.
- Tatlicioğlu, E., I. D. Walker and D. M. Dawson (2007). New dynamic models for planar extensible continuum robot manipulators. Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Tedrake, R. (2009). "Underactuated Robotics: Learning, Planning, and Control for Efficient and Agile Machines: Course Notes for MIT 6.832." Working draft edition: 3.
- Transth, A. A., K. Y. Pettersen and P. Liljebäck (2009). "A survey on snake robot modeling and locomotion." *Robotica* 27(7): 999-1015.
- Trivedi, D., A. Lotfi and C. D. Rahn (2007). Geometrically exact dynamic models for soft robotic manipulators. Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Trivedi, D., A. Lotfi and C. D. Rahn (2008). "Geometrically exact models for soft robotic manipulators." *IEEE Transactions on Robotics* 24(4): 773-780.
- Trivedi, D., C. D. Rahn, W. M. Kier and I. D. Walker (2008). "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research." *Applied Bionics and Biomechanics* 5(3): 99-117.
- Van Leeuwen, J. and W. M. Kier (1997). "Functional design of tentacles in squid: linking sarcomere ultrastructure to gross morphological dynamics." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 352(1353): 551-571.
- Walker, I. D. (2013). "Continuous backbone "continuum" robot manipulators." *ISRN Robotics* 2013.
- Webster III, R. J. and B. A. Jones (2010). "Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review." *The International Journal of Robotics Research* 29(13): 1661-1683.
- Webster III, R. J., J. M. Romano and N. J. Cowan (2009). "Mechanics of precurved-tube continuum robots." *IEEE Transactions on Robotics* 25(1): 67-78.
- Wehner, M., R. L. Truby, D. J. Fitzgerald, B. Mosadegh, G. M. Whitesides, J. A. Lewis and R. J. Wood (2016). "An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots." *Nature* 536(7617): 451-455.
- Wilson, J., D. Li, Z. Chen and R. George (1993). "Flexible robot manipulators and grippers: Relatives of elephant trunks and squid tentacles." *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?*: 475-494.
- Wingert, A., M. D. Lichter, S. Dubowsky and M. Hafez (2002). Hyper-redundant robot manipulators actuated by optimized binary-dielectric polymers. *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, International Society for Optics and Photonics.
- Wolf, A., H. B. Brown, R. Casciola, A. Costa, M. Schwerin, E. Shamas and H. Choset (2003). A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks. Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.
- Worst, R. and R. Linnemann (1996). Construction and operation of a snake-like robot. Intelligent and Systems, 1996., IEEE International Joint Symposia on, IEEE.
- Wright, C., A. Buchan, B. Brown, J. Geist, M. Schwerin, D. Rollinson, M. Tesch and H. Choset (2012). Design and architecture of the unified modular snake robot. Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, IEEE.
- Xu, K. and N. Simaan (2008). "An investigation of the intrinsic force sensing capabilities of continuum robots." *IEEE Transactions on Robotics* 24(3): 576-587.
- Yahya, S., M. Moghavvemi, S. Yang and H. A. Mohamed (2009). Motion planning of hyper redundant manipulators based on a new geometrical method. *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on, IEEE.*
- Yang, Y. and W. Zhang (2014). ET Arm: Highly Compliant Elephant-Trunk Continuum Manipulator. *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Springer.
- Yang, Y. and W. Zhang (2015). An elephant-trunk manipulator with twisting flexional rods. Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015 IEEE International Conference on, IEEE.
- Yekutieli, Y., R. Sagiv-Zohar, R. Aharonov, Y. Engel, B. Hochner and T. Flash (2005). "Dynamic model of the octopus arm. I. Biomechanics of the octopus reaching movement." *Journal of neurophysiology* 94(2): 1443-1458.
- Yu, C., K. Crane and S. Coros (2017). "Computational design of telescoping structures." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 36(4): 83.
- Yu, S., S. Ma, B. Li and Y. Wang (2011). An amphibious snake-like robot with terrestrial and aquatic gaits. Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, IEEE.
- Zhu, H. (2003). Single Motor Driven Hyper-Redundant Manipulator, Published in: <http://www.imdl.gatech.edu/haihong/Arm/Arm.html>.
- Zinn, M., O. Khatib, B. Roth and J. K. Salisbury (2004). "Playing it safe [human-friendly robots]." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 11(2): 12-21.