

Cinemática de un robot con curvatura constante^{*}

Alberto A. Duarte^{*} Ana Y. Aguilar-Bustos^{**}
M. C. Rodríguez-Liñán^{***}

^{*} TecNM-ITEnsenada, Baja California C.P. 22780
(e-mail: alejandro.duarte@ite.edu.mx)

^{**} TecNM-ITEnsenada, Baja California C.P. 22780
(e-mail: aaguilar@ite.edu.mx)

^{***} Conacyt-TecNM-ITEnsenada, Baja California C.P. 22780
(e-mail: mcrodriguez@conacyt.mx)

Resumen En este trabajo se presenta una metodología para obtener el modelo cinemático de un robot altamente articulado, con curvatura constante. A diferencia de los modelos empleados usualmente en la literatura, el método propuesto puede ser aplicado tanto a robots que tienen eslabones rígidos, como para aquellos que son del tipo continuo. Además, este método no presenta el problema de singularidad que tienen los métodos basados en curvatura de arco.

Keywords: Robótica y mecatrónica, modelado de sistemas, robots híper redundantes, curvatura constante, robots continuos, sistemas electromecánicos,

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido un gran interés por el estudio de robots flexibles. Una manera de lograr que un robot sea flexible es aumentando el número de articulaciones. Debido a que en la robótica convencional los grados de libertad (GDL) son proporcionales al número de articulaciones, a los robots manipuladores altamente articulados se les ha considerado como híper redundantes, sin embargo, como se explicará en el presente trabajo, la mayoría de ellos no lo son. Por esta razón, en el presente artículo se inicia con la revisión del estado del arte de los robots híper redundantes, ya que es ahí donde se inició el estudio de los robots flexibles altamente articulados.

Los robots híper redundantes son aquellos que tienen un muy alto grado de redundancia cinemática, es decir, aquellos robots cuyos GDL son muchos más que los necesarios para realizar una tarea. Los robots de este tipo se han inspirado en sistemas biológicos tales como serpientes, la trompa del elefante y gusanos. A diferencia de los robots manipuladores convencionales, los cuales generalmente se utilizan en espacios de trabajo predefinidos y estructurados, los robots híper redundantes están diseñados para efectuar tareas que se realizan en ambientes restringidos o de difícil acceso, tales como rescate en zonas de desastre, cirugías, etc.

Los robots híper redundantes se han clasificado en dos tipos: de eslabones rígidos, y del tipo continuo. Debido a la complejidad de los robots híper redundantes, las técnicas tradicionales de modelado han resultado difíciles de visualizar e implementar por lo que se han desarrollado técnicas que se acoplan de mejor manera a la estructura de este tipo de mecanismos, Siciliano and Khatib (2008).

El estudio formal de los robots híper redundantes se inicia con el trabajo de tesis doctoral realizado por Chirikjian (1992), quién desarrolló el primer análisis cinemático para robots híper redundantes. Chirikjian utilizó el modelo integral de una curva k parametrizada por su longitud de arco s , para establecer el modelo cinemático de un robot híper redundante. Siguiendo el camino de la parametrización de la curva, Hannan and Walker (2001) utilizaron las fórmulas de Frenet-Serret para derivar la cinemática directa de una sección de un robot con curvatura constante. Posteriormente, Hannan and Walker (2003) extendieron esta metodología utilizando geometría de arco, donde se aplicó el algoritmo Denavit-Hartenberg con una pequeña modificación: se consideró a cada sección de curvatura constante como un eslabón rígido (virtual), en el cual, por medio de tres transformaciones discretas (rotación, traslación, rotación) se obtuvo la cinemática de un manipulador continuo. En Jones and Walker (2006) se extiende esta metodología considerando las restricciones físicas de los actuadores para producir resultados más precisos. Sin embargo, existen dos desventajas al utilizar este tipo de análisis: la primera es que, debido a que las ecuaciones resultantes para establecer la posición (x, y) del efector final están en función de la curvatura, existe singularidad cuando la curvatura es cero, esto es, cuando cualquiera de las secciones del robot es recta. La segunda desventaja surge al considerar a todos los robots como si fueran totalmente continuos, aún a aquellos que están formados por eslabones rígidos, por lo que en estos últimos existe un error en la determinación de la posición final del efector.

Otro enfoque que se emplea con frecuencia está basado en el análisis modal, desarrollado por Chirikjian and Burdick (1994), en Godage et al. (2011) se propone el análisis modal reemplazando los términos paramétricos por polinomios multivariados. Este trabajo es extendido en Godage and Walker (2015) donde se emplean cuaterniones, en

^{*} Este trabajo es apoyado por CONACYT a través de una beca de doctorado asignada a Alberto A. Duarte.



Figura 1. Robot trompa de elefante, imagen tomada de Hannan and Walker (2003)

lugar de matrices de transformación homogénea. Sin embargo, este método de seguimiento de curvas, asume que se pueden controlar exactamente todos los parámetros del robot, y que todas sus características son completamente conocidas, lo que en general no es así; además limita la configuración de los robots a un conjunto reducido de movimientos.

Todos los trabajos hasta aquí presentados abordan el problema de la cinemática para robots híper redundantes considerando que estos tienen un número infinito de eslabones, esto es, que son completamente “continuos”, aun cuando no todos los robots de este tipo cumplen esa condición, como es el caso del robot que se muestra en la Figura 1.

En este trabajo se presenta la cinemática directa de un robot con curvatura constante, basado en matrices de transformación homogénea, que es geométricamente exacto. El método propuesto no presenta el problema de singularidad observado en los modelos descritos en función de la curvatura k , y puede ser aplicado tanto en robots con eslabones rígidos, como en aquellos del tipo continuo. Además, permite observar cómo, gradualmente, un robot con eslabones rígidos se comporta de forma continua a medida que aumenta el número de sus eslabones. En el presente trabajo se llamarán robots continuos (RC) a aquellos que carecen de articulaciones, y robots altamente articulados (RAA) a aquellos que están compuestos por eslabones rígidos, en ambos casos los robots pueden doblarse de manera constante a lo largo de su estructura, razón por la cual, en la literatura, se les ha clasificado erróneamente dentro de los robots híper redundantes. Este punto se discutirá más a fondo en el siguiente apartado.

2. PREELIMINARES

2.1 Curvatura constante

Debido a su configuración, los RC y RAA que son actuados de manera continua a lo largo de toda su estructura, ya sea por cables, Li and Rahn (2002) o por algún fluido, McMahan et al. (2005), se doblan en la misma proporción, es decir, tienen curvatura constante.

De acuerdo con Walker (2013), esto se debe a que la energía potencial interna de cada sección está uniformemente distribuida, por lo que las fuerzas internas actúan para equilibrar los grados de libertad pasivos (no actuados), provocando que la estructura se doble formando una curva

constante. Esta propiedad fue utilizada en Hannan y Walker (2001) para determinar la curvatura de cada sección del manipulador, donde se consideró que cada una de las articulaciones (para cada sección de curvatura) debían de rotar en la misma proporción para formar una curvatura constante. Entonces, para que la energía potencial interna sea uniformemente distribuida, la longitud y el ángulo de los eslabones deben ser los mismos, Hannan and Walker (2003).

Por lo tanto, el hecho de que la estructura se doble de manera constante deberá depender estrictamente de la distribución uniforme de estos parámetros. Cabe destacar que cuando se aplica una carga al mecanismo, debido a que las fuerzas ya no se encuentran distribuidas de manera uniforme la curvatura se deforma (se pandea), Rucker and III (2011). Sin embargo, aún bajo esas condiciones, sigue siendo una buena aproximación que ha sido ampliamente utilizada. Este enfoque de curvatura constante ha sido validado experimentalmente en distintos robots Hannan and Walker (2003), Jones and Walker (2006), Neppalli et al. (2007), Bardou et al. (2010) y Zhao and Gao (2010).

2.2 Robots rígidos, continuos e híper redundantes

Como se mencionó anteriormente, los robots híper redundantes se han clasificado como robots rígidos y robots continuos, Siciliano and Khatib (2008). Sin embargo, la mayoría de este tipo de robots no tienen una verdadera híper redundancia cinemática. Esto se debe a que se doblan en la misma proporción a lo largo de su estructura (curvatura constante). Algunos autores han exhibido este problema; por ejemplo, Hannan and Walker (2003) mencionan que los robots híper redundantes se pueden distinguir de los RC, tomando en consideración que los robots híper redundantes son aquellos que tienen muchos más GDL *actuados* que los GDL del espacio de trabajo. Mientras que, los RC pueden tener muchos más GDL que los del espacio de trabajo, pero no necesariamente todos ellos son actuados. Por su parte, Robert J. Webster and Jones (2010) definen a los RC como aquellos que cuentan con una estructura elástica que se puede doblar de forma continua y que tiene un número infinito de GDL.

Las definiciones anteriores consideran que tanto los RC, como los robots rígidos con curvatura constante, tienen muchos grados de libertad; infinitos para el caso de los continuos y finitos para el caso de los rígidos. Sin embargo, debido a que cada sección de estos robots se dobla de manera continua a lo largo de toda su estructura, las articulaciones no proporcionan realmente un GDL ya que no son articulaciones libres, es decir, están restringidas físicamente, por lo tanto, cada sección del robot para el caso planar, tiene un GDL, considerando que el número de GDL de un robot es el menor número de coordenadas que se necesitan para establecer su configuración, Lynch and Park (2017). Si se observa la Figura 2, la configuración del robot puede ser representada únicamente por α , ya que la longitud de arco s (longitud de la sección) es constante. Por ejemplo, el robot de la Figura 1 tiene cuatro secciones que están actuadas de manera independiente cada una, en este caso el robot tiene cuatro GDL (para el caso planar).

Por otra parte, existen robots que no son completamente continuos, es decir tienen eslabones rígidos pero

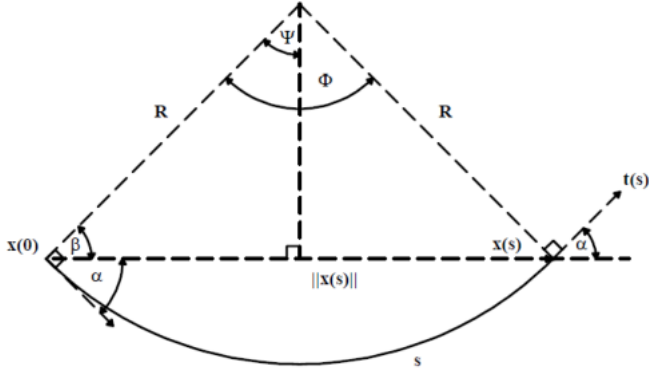


Figura 2. Esquema basado en geometría de arco de Hannan and Walker (2003)

se comportan de manera similar a los robots continuos (presentan curvatura constante). Tal es el caso del robot desarrollado en Clemson University llamado Elephant's Trunk Manipulator, ver Figura 1. Este tipo de robots han sido denominados como HDOF (High Degree Of Freedom), Gravagne and Walker (2002). Así, de acuerdo a esta definición, la diferencia básica entre un RC y uno tipo HDOF, es que uno tiene eslabones y el otro no, por lo cual se pueden considerar continuos a aquellos manipuladores que se comporten de manera similar. Sin embargo, como se dijo anteriormente, las articulaciones en cada sección de este tipo de mecanismos no representan un GDL, como es el caso de los manipuladores convencionales, debido a que están restringidos a doblarse de forma constante. Esto es, todas las articulaciones tendrán la misma magnitud. Nótese que, aun en el caso de que exista una fuerza externa que deforme la estructura, las articulaciones siguen estando restringidas. Por esta razón, en el presente trabajo, se denomina a los robots de este tipo como robots altamente articulados o RAA.

Se puede inferir entonces que existe una relación estrecha entre lo que es un RC y un RAA, y que la 'continuidad' de un robot de este tipo aumenta en proporción al número de eslabones; lo cual debe de poder observarse en su modelo cinemático. Además, es necesario que en el modelo cinemático se tome en cuenta el hecho de que no todos los robots son totalmente continuos, ya que hay aplicaciones donde se requiere que la *curvatura de la columna* (Backbone curvature) esté compuesta por eslabones rígidos, como es el caso del robot presentado por Yigit and Boyraz (2017).

En la literatura, se han utilizado distintos enfoques para derivar la cinemática directa de una sección de un robot continuo con curvatura constante, sin embargo, todos ellos llegan fundamentalmente al mismo resultado, Robert J. Webster and Jones (2010), Walker (2013). Por lo anterior, se elegirá el enfoque presentado en Hannan and Walker (2003) para compararlo con el modelo propuesto en el presente trabajo.

En la Figura 2 se muestra el esquema propuesto en Hannan and Walker (2003) para modelar la cinemática de cada sección, para RC y RAA con curvatura constante. Este se basa en tres movimientos discretos: una rotación α , una traslación $\|x(s)\|$ y de nuevo otra rotación α . Estas transformaciones se utilizan como los parámetros

Denhavit-Hartenberg modificados, con los que posteriormente se construye la matriz de transformación homogénea en términos de la curvatura k y la longitud de arco s . Aquí, α es el ángulo formado entre la tangente de la curva en el principio y fin de efector y la línea recta que une ambos puntos.

Así, α puede calcularse como

$$\alpha = \frac{ks}{2}, \quad (1)$$

donde k representa la curvatura, y s es la longitud de arco. La matriz de transformación se define entonces como

$${}^0_3H = \begin{bmatrix} \cos(sk) & -\sin(sk) & 0 & \frac{1}{k}(\cos(sk) - 1) \\ \sin(sk) & \cos(sk) & 0 & \frac{1}{k}(\sin(sk) - 1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. MODELO CINEMÁTICO PROPUESTO

A continuación se presenta el modelo cinemático de una sección de curvatura constante que puede ser aplicado tanto para RC, como para RAA, con curvatura constante.

En la Figura 3 se presenta un manipulador planar con tres articulaciones de rotación $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ y con longitudes de los eslabones $\{L_1, L_2, L_3\}$. La posición y la orientación del efector final, respecto al marco de coordenadas $\{1\}$, están dadas por

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (4)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (5)$$

Por lo tanto, para un robot planar de n articulaciones se tiene

$$x_n = \sum_{i=1}^n L_i \cos \sum_{j=1}^i \theta_j \quad (6)$$

$$y_n = \sum_{i=1}^n L_i \sin \sum_{j=1}^i \theta_j \quad (7)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (8)$$

De acuerdo con lo mencionado en la sección anterior, en los RAA con curvatura constante, se debe de cumplir que

$$\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_n = \theta \quad (9)$$

$$L_1 = L_2 = \dots = L_n = L. \quad (10)$$

Así, la posición y orientación del efector final estarán dadas como

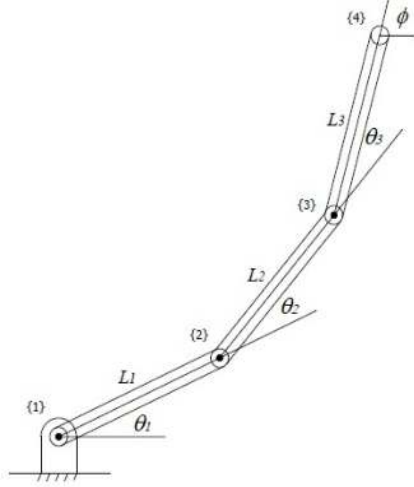


Figura 3. Robot planar 3R.

$$x_n = L \sum_{i=1}^n \cos(i\theta) \quad (11)$$

$$y_n = L \sum_{i=1}^n \sin(i\theta) \quad (12)$$

$$\phi_n = n\theta \quad (13)$$

La matriz de transformación homogénea quedará entonces expresada de la siguiente forma:

$${}^0_nA = \begin{bmatrix} \cos(\phi_n) & -\sin(\phi_n) & x_n \\ \sin(\phi_n) & \cos(\phi_n) & y_n \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Nótese que las ecuaciones (11)–(14) representan la cinemática directa de una sección de un robot con curvatura constante. Sin embargo, hay robots que tienen más de una sección, como es el caso del robot presentado en la Figura 1; este cuenta con 4 secciones de curvatura constante (de 8 eslabones por sección). Por tanto, si se considera que se tiene un robot con un número m de secciones de curvatura constante, la cinemática se puede obtener por medio del producto de las m matrices de transformación homogénea.

La Figura 4 representa el esquema propuesto en este trabajo, donde el ángulo α se define como

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_n}{x_n}\right) \quad (15)$$

Sin embargo, para poder determinar el ángulo θ que ha de introducirse para obtener el valor deseado de α , es necesario determinar la relación que existe entre ambos. Por geometría, esta relación está dada como

$$n\theta = \beta + \alpha, \quad (16)$$

$$\beta + \theta = \alpha. \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación (16) en (17), se tiene que

$$\theta = \frac{2\alpha}{n+1}. \quad (18)$$

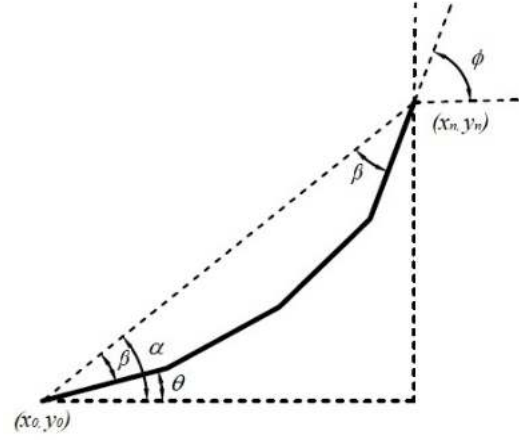


Figura 4. Representación de un robot planar con n eslabones y curvatura constante.

Como se puede observar, la ecuación (18) tiene en cuenta el número de eslabones, mientras que en la ecuación (1) propuesta por Hannan and Walker (2003), que está expresada en función de la curvatura y la longitud de arco, se considera que no hay eslabones en la estructura.

4. RESULTADOS

Con el fin de validar las ecuaciones obtenidas en las secciones previas, se realizó una comparación del modelo cinemático de un robot altamente articulado con curvatura constante (RAA-CC), realizado en el presente trabajo, y el modelo por geometría de arco (GA) de Hannan and Walker (2003). Este último fue elegido para la evaluación de resultados debido a que es el método mayormente utilizado en la literatura para este tipo de robots, Singh et al. (2017).

Las Figuras 5-7 muestran simulaciones por medio de Matlab®, para diferentes valores del ángulo α . Se puede observar que, mientras más grande sea el valor del ángulo α deseado, mayor será el error en la posición del efector final. Esto es debido al efecto acumulativo de las magnitudes de los ángulos θ . Las simulaciones que se describen a continuación se realizaron con los parámetros presentados por Hannan and Walker (2003) para una sección del robot trompa de elefante. Es decir, se considera una sola sección formada por 8 eslabones.

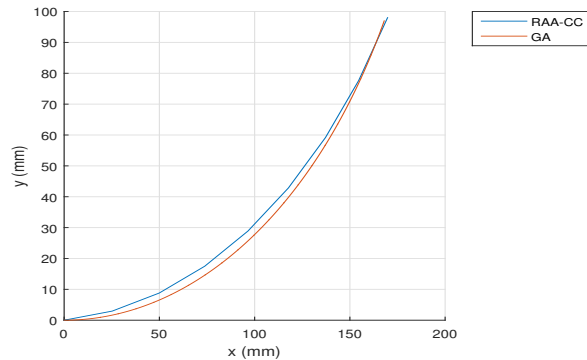


Figura 5. Comparación de RAA-CC y GA con ángulo $\alpha = 30^\circ$.

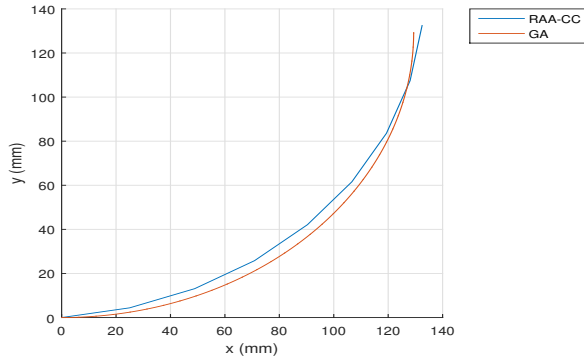


Figura 6. Comparación de RAA-CC y GA con ángulo $\alpha = 45^\circ$.

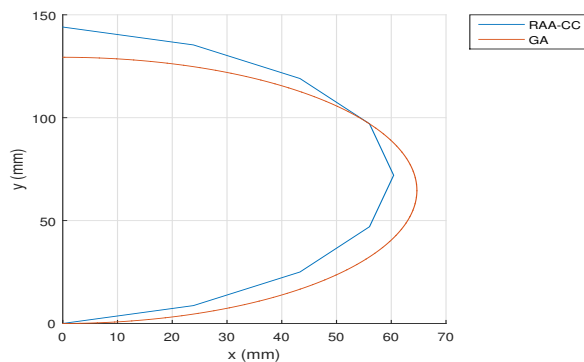


Figura 7. Comparación de RAA-CC y GA con ángulo $\alpha = 90^\circ$.

Posteriormente, se realizaron comparaciones entre el modelo GA y el modelo RAA-CC para secciones de longitud unitaria con diferente número de eslabones. El objetivo de estas simulaciones es evaluar la convergencia en posición entre un robot continuo, modelado por método de Hannan and Walker (2003), y un robot tipo RAA-CC, modelado por el método propuesto en el presente artículo. Los resultados de esta comparación se muestran en las Figuras 8 y 9. Puede apreciarse que, a medida que aumenta el número de eslabones, ambos modelos convergen, demostrando que el modelo RAA-CC propuesto puede ser aplicado a robots continuos.

El modelo propuesto permite configurar cualquier sección de curvatura en posición recta, esto es, cuando la curva-

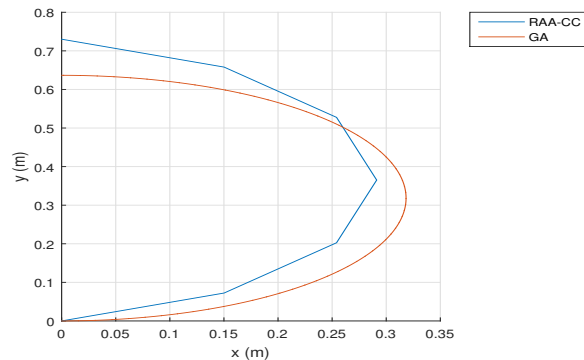


Figura 8. Comparación de RAA-CC y GA con ángulo $\alpha = 90^\circ$, considerando 6 eslabones para el RAA-CC.

tura del arco está dada como $k = 0$. En esta configuración se tendría un ángulo deseado $\alpha = 0^\circ$, y como puede observarse en la Figura 10, el esquema RAA-CC es capaz de alcanzar la configuración deseada.

Finalmente, el espacio de trabajo correspondiente a un manipulador del tipo RAA-CC se ilustra en la Figura 11. Se consideró un robot consistente en una sola sección de curvatura compuesta de 8 eslabones, y longitud unitaria. El espacio se generó por medio de un barrido en el ángulo $\alpha = [-180^\circ, 180^\circ]$.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo propone un modelo cinemático para un robot altamente articulado con curvatura constante. Se demostró que este método puede ser aplicado también para robots continuos simplemente aumentando el número de eslabones, de acuerdo con la exactitud que se desee. Esto, a su vez, redundaría en una reducción del costo computacional asociado al cálculo de la cinemática del manipulador, ya que en aplicaciones que no requieran mayor exactitud se pueden reducir los cálculos. El modelo propuesto permite observar que en un robot cuyos eslabones son de la misma longitud y sus variables de articulación iguales, a medida que aumenta el número de eslabones, la curva se aproxima a la curva parametrizada por el arco de un círculo, esto es, el robot se asemeja a uno continuo. Además, el modelo no presenta el problema de singularidad cuando la curvatura es cero, ya que este no se encuentra en función de la curvatura de arco. En el presente trabajo se logró aclarar en mayor medida el comportamiento de este tipo de mecanismos estableciendo el hecho de que cada articulación no proporciona, en realidad, un grado de libertad al mecanismo. Por lo tanto, este tipo de robots no pueden ser considerados ni altamente redundantes, ni híper redundantes. Solamente podrían considerarse redundantes (o híper redundantes, según sea el caso) si se aumentara el número de secciones, siendo cada sección del robot un eslabón flexible altamente articulado, o con articulaciones infinitesimales para el caso continuo.

5.1 References

REFERENCIAS

Bardou, B., Zanne, P., Nageotte, F., and de Mathelin, M. (2010). Control of a multiple sections flexible

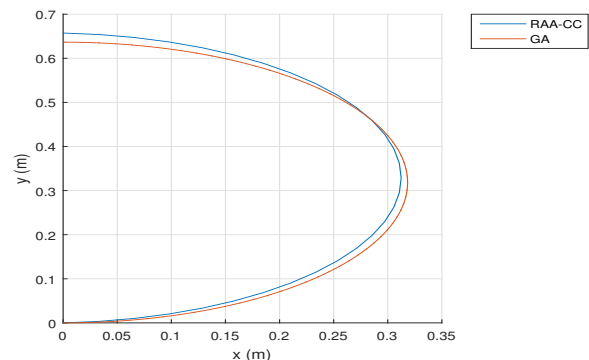


Figura 9. Comparación de RAA-CC y GA con ángulo $\alpha = 90^\circ$, considerando 30 eslabones para el RAA-CC.

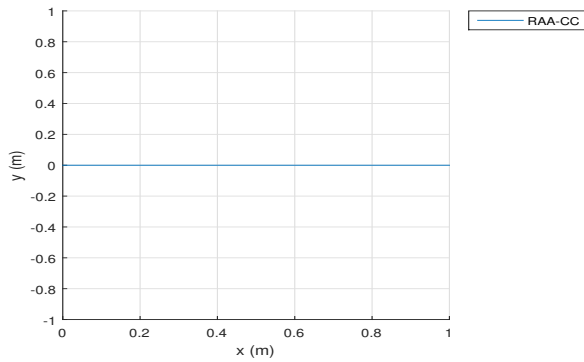


Figura 10. El modelo RAA-CC propuesto no presenta singularidad cuando el ángulo $\alpha = 0^\circ$.

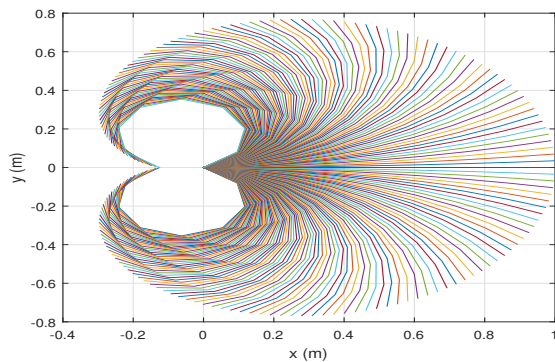


Figura 11. Espacio de trabajo para un robot tipo RAA-CC, para $\alpha = [-180^\circ, 180^\circ]$, considerando una sección de longitud unitaria, de 8 eslabones.

- endoscopic system. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2345–2350.
- Chirikjian, G.S. (1992). *Theory and applications of hyper redundant robotics manipulators*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Chirikjian, G.S. and Burdick, J.W. (1994). A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(3), 343–354.
- Godage, I.S., Guglielmino, E., Branson, D.T., Medrano-Cerda, G.A., and Caldwell, D.G. (2011). Novel modal approach for kinematics of multisection continuum arms. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1093–1098.
- Godage, I.S. and Walker, I.D. (2015). Dual quaternion based modal kinematics for multisection continuum arms. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1416–1422.
- Gravagne, I.A. and Walker, I.D. (2002). Manipulability, force, and compliance analysis for planar continuum manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(3), 263–273.
- Hannan, M. and Walker, I.D. (2001). Analysis and experiments with an elephant's trunk robot. *Advanced Robotics*, 15(8).
- Hannan, M.W. and Walker, I.D. (2003). Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots. *Journal of Robotic Systems*, 20(2), 45–63.
- Jones, B.A. and Walker, I.D. (2006). Kinematics for multisection continuum robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1), 43–55.
- Li, C. and Rahn, C. (2002). Design of continuous backbone, cable-driven robots. *Journal of Mechanical Design*, 124, 265–271.
- Lynch, K.M. and Park, F.C. (2017). *Modern Robotics, Mechanics, Planning and Control*. Cambridge University Press.
- McMahan, W., Jones, B.A., and Walker, I.D. (2005). Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-octor. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2578–2585.
- Neppalli, S., Jones, B., McMahan, W., Chitrakaran, V., Walker, I., Pritts, M., Csencsits, M., Rahn, C., and Grissom, M. (2007). Octarm - a soft robotic manipulator. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2569–2569.
- Robert J. Webster, I. and Jones, B.A. (2010). Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review. *The International Journal of Robotics Research*, 29(13), 1661–1683.
- Rucker, D.C. and III, R.J.W. (2011). Statics and dynamics of continuum robots with general tendon routing and external loading. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(6), 1033–1044.
- Siciliano, B. and Khatib, O. (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition.
- Singh, I., Lakhal, O., and Merzouki, R. (2017). Towards extending forward kinematic models on hyper-redundant manipulator to cooperative bionic arms. *Journal of Physics: Conference Series*, 783(1), 012056.
- Walker, I.D. (2013). Continuous backbone "continuum" robot manipulators. *ISRN Robotics*, 2013, 1–19.
- Yigit, C.B. and Boyraz, P. (2017). Design and modelling of a cable-driven parallel-series hybrid variable stiffness joint mechanism for robotics. *Mechanical Sciences*, 8(1), 65–77.
- Zhao, Q. and Gao, F. (2010). Design and analysis of a kind of biomimetic continuum robot. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 1316–1320.