

ROBÓTICA NO CONVENCIONAL: INTRODUCCIÓN

Joel Aparicio-Pérez
Edgar García-Ramírez
Magdalena Marciano-Melchor
Juan Carlos Herrera-Lozada

CIDETEC-Instituto Politécnico Nacional
Departamento de Posgrado
e-mails: japarciop001@hotmail.com

Resumen

El presente documento introduce el tema de tensegridad, orígenes del concepto, definiciones y ejemplos de aplicaciones en robótica bioinspirada y suave, con el propósito de mostrar las ventajas que tiene dicho tema en comparación con la robótica convencional.

Introducción

La tensegridad es un concepto físico que surge de la contracción de las palabras tensional e integrity (integridad tensional). La tensegridad se define como la propiedad que presentan determinadas estructuras cuya estabilidad depende del equilibrio entre las fuerzas de tracción y de compresión que la conforman. Una estructura de tensegridad generalmente está construida de elementos elásticos llamados tendones y otros fijos denominados barras, que interactúan entre sí para garantizar la estabilidad, ver Figura 1. Uno de los principales beneficios que presenta este tipo de estructura es la excelente capacidad de absorber energía con un mínimo uso de materiales que las hace muy livianas [1-3].

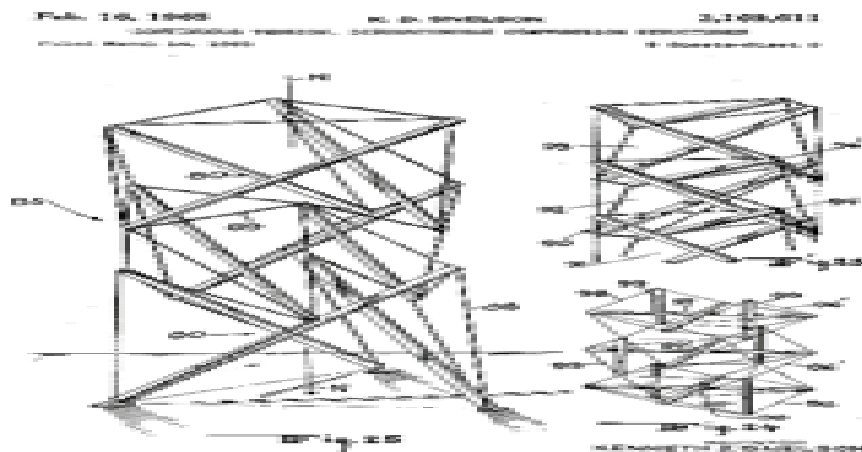


Figura 1. Estructura de tensegridad propuesta por Snelson. Imagen tomada de [2].

Las tecnologías desarrolladas en área de robótica, actualmente son capaces de asemejar el movimiento animal y humano, así como la aplicación directa del desarrollo de tecnologías en camuflaje para sistemas de defensa, búsqueda y rescate, sistemas de amortiguación, refrigeración de edificaciones, entre otros. Tales contribuciones han sido posibles gracias a los trabajos realizados en la bioinspiración, también llamada biomimética, ciencia que estudia las dinámicas existentes en la naturaleza para aplicarlas a las nuevas tecnologías. Uno de los primeros ejemplos de aplicación de modelo bioinspirado es el del velcro, en 1941 el ingeniero suizo George de Mestral se planteó responder a una pregunta que le intrigaba: ¿por qué las semillas de la planta *Arctium minus*, el lampazo, se agarran a la ropa?, en respuesta dio origen a un sistema que imita el mecanismo de dicha planta [4]. Un aval de la afirmación del buen comportamiento de la naturaleza lo afirma la bióloga Janine Benyus en [5]. En muchos casos los ingenieros han encontrado en la biología una fuente de inspiración para la creación de mecanismos [6], tales como Spot y Atlas, ver Figura 2, ambos desarrollados por Boston Dynamics, el primero de ellos un robot cuadrúpedo que es capaz de transportar cargas pesadas en terrenos difíciles y el segundo un robot humanoide, el cual tiene un caminar de tipo bípedo que mantiene el equilibrio a partir de la implementación de sensores y tecnología LIDAR. Así también el desarrollo por parte de la Universidad de Stanford con el robot insecto Scamp, prototipo que puede trepar, saltar y volar de forma autónoma, ver Figura 3.



Figura 2. Desarrollados por Buston Dynamics. Imágenes tomadas de: <https://www.bostondynamics.com/spot> y <https://www.bostondynamics.com/atlas>.

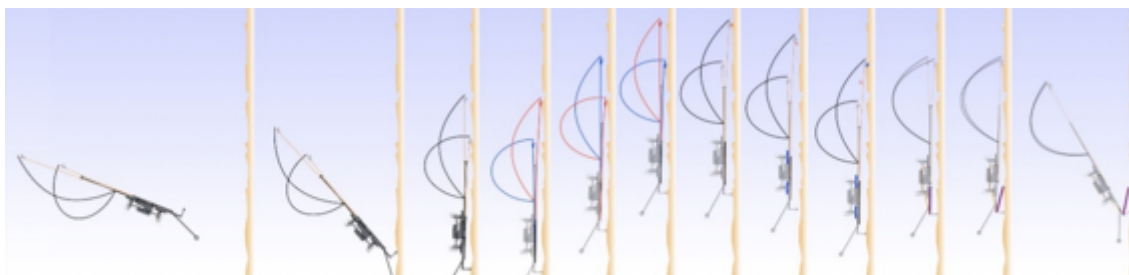


Figura 3. SCAMP desarrollo por la Universidad de Stanford. Imagen tomada de: <http://bdml.stanford.edu/Main/SCAMP>.

Una de las características que se presenta al desarrollar modelos sintéticos a partir de los modelos biológicos, es la elección del tipo de materiales, en el ámbito del desarrollo de mecanismos en esta temática, nos encontramos con la herramienta de softrobotic [6], ver Figura 4, que nos permite tener mecanismos flexibles, pero a la vez resistentes. La suavidad y conformación corporal son características

destacadas que los sistemas biológicos explotan a menudo, que tienden a la simplicidad y muestran una complejidad reducida en sus interacciones con su entorno. El estudio de sistemas biológicos actualmente culmina en la definición de una nueva clase de máquina que podemos denominar robots blandos. Cuando hablamos de estos temas se debe distinguir dos enfoques respecto a la interacción suave: el control del actuador de rigidez del robot con enlaces rígidos y la suavidad intrínsecamente debido a las características pasivas de los equipos de robot [6], [7].

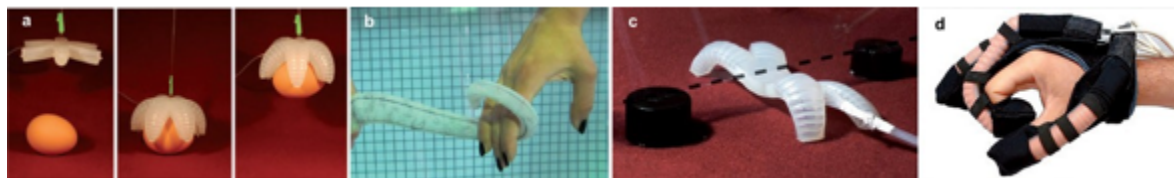


Figura 4. (a) Pinzas hechas de materiales suaves. (b) Manipulador bioinspirado en un tentáculo de pulpo. (c) Robot cuadrúpedo hecho con materiales blandos. (d) Guante de rehabilitación con actuadores suaves. Imágenes tomadas de [6].

Contenido

La palabra “robot” se refiere a una máquina electromecánica que tiene componentes biomiméticos y características de movimiento, que le dan la capacidad de manipular objetos y percibir su entorno junto con un cierto grado de inteligencia. Esta palabra fue utilizada por primera vez en 1921 por el escritor checo Karel Čapek en su obra *Robots Universales de Rossum* (R.U.R.). En la literatura encontramos que la palabra “robot” proviene de la palabra checa (también eslovaca) *robot*, que significa “trabajo duro” o “esclavitud”. El significado de la palabra ha evolucionado y se asocia cada vez más con mecanismos inteligentes que tienen una forma y funciones de inspiración biológica [8]. En este trabajo introductorio se presentan las investigaciones de robots con estructuras de tensegridad, ideas bioinspiradas y la implementación de materiales suaves o blandos en el área de la robótica, enfocándonos mayormente en proyectos de investigaciones sobre robot móviles o zoomórficos.

Algunas de las ventajas mostradas por los robots con estructuras de tensegridad son:

- Liviano peso.
- Resistencia a golpes o caídas.
- Capacidad de autodeformarse y regresar a su forma original.
- Flexibilidad.
- Estructura simple.
- Robusto ante fallas.
- Capacidad de modos de locomoción únicos.

Pese a las ventajas antes mencionadas existen también sus desventajas como:

- Dificultad de control por su naturaleza oscilatoria.
- Acoplamiento no lineal entre componentes.
- Complejidad general.

A continuación, presentamos algunos ejemplos de implementación de uno o más de estos conceptos en el área de la robótica que abarcan simulaciones, así como prototipos. Existen trabajos de simulación para el control de la locomoción de estructuras de tensegridad, podemos mencionar el trabajo realizado por Wenjuan et al. [9], ver Figura 5, al simular una estructura de tensegridad de 6 barras en ODE (Open Dynamic Engine) biblioteca gratuita de calidad industrial para simular la dinámica de cuerpos rígidos articulados con detección de colisión incorporada, se puede desarrollar en C o C++ y los resultados de la simulación le permitieron implementar lo aprendido de dicha simulación en un prototipo.

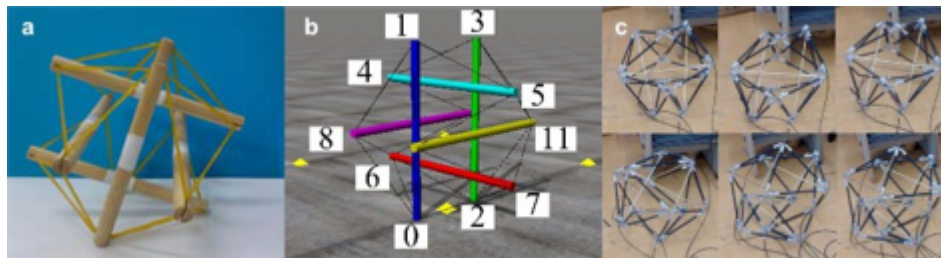


Figura 5. (a) Modelo base de un icosaedro. (b) Simulación en ODE. (c) Prototipo utilizado para desarrollo del proyecto. Imagen tomada de [9].

Por otro lado, Luo et al. [10] trabajó con una estructura de tensegridad de cuatro barras, ver Figura 6, primero simulándolo para estudiar la dinámica de movimiento de la estructura, corrigiendo problemas y posteriormente implementarlo lo aprendido en el prototipo.

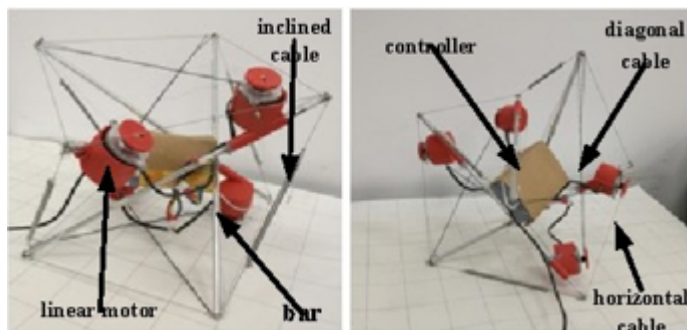


Figura 6. Prototipo utilizado por Lou et al. Imagen tomada de [10].

El trabajo presentado por Böhm et al. [11] considerado un robot móvil rodante que consta de una estructura de tensegridad simple con 2 miembros curvos desconectados rígidos, estos están conectados a una red continua de 8 miembros tensionados pretensados. El movimiento se induce gracias a 2 masas internas, emplea un modo de locomoción uniaxial de rodamiento puro y plana los cuales requieren poco esfuerzo. También tenemos a Super Ball Bot desarrollado por la NASA, es una plataforma de movilidad y aterrizaje todo en uno basada en estructuras de tensegridad, consta de 6 barras y es un proyecto enfocado a la exploración planetaria, su último objetivo es la exploración de una de las lunas del planeta Saturno llamado Titán. Se presentó una fase final de esta investigación en el 2015 y se conoce que existe una nueva investigación de este proyecto conocido como Superball v2 [12], ver Figura 7.

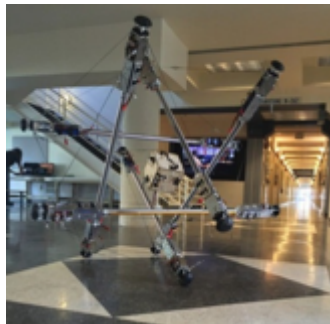


Figura 7. Proyecto SUPERBall Bot desarrollado por la NASA para exploración planetaria. Imagen tomada de [12].

En los ejemplos anteriores la base de la generación de su movimiento es la tensión y distensión de sus cables, lo cual permite cambiar la forma y con ayuda de la gravedad producir un desplazamiento sobre distintos tipos de superficies. Para este tipo de estructuras de tensegridad también se han propuesto diferentes formas de control para estructuras de 3, 4 o 6 barras, por ejemplo, Paul [13] implemento algoritmos genéticos, Wenjuan et al. [14] uso un método analítico basado en FEM (finite-element method), Iscen et al [15] utiliza algoritmos coevolutivos combinados con señales de lazo abierto y algoritmos evolutivos usando como modelo a controlar al proyecto SEPERBall con forma de icosaedro en [16], durante la investigación probaron varios algoritmos como resultado obtuvieron que un algoritmo evolutivo centralizado y uno multiagente fueron 400 % y 800 %, respectivamente, mejor que una solución codificada a mano, controles basados en generadores de patrones centrales (CPG por sus siglas en inglés) que ha tenido múltiples aplicaciones en proyectos de robótica, este último ha tenido aplicaciones en robots de estructuras de tensegridad como en la investigación de Masic y Skelton [17], Moored et al. [18] quien dota de movimiento a una aleta de manta raya bionspirada, Mirlletz et al. en [19] presenta un enfoque basado en goal-directed en conjunto de redes neuronales artificiales que le permite controlar todo el cuerpo en un robot de tensegridad bioinspirado en una medula espinal con varios grados de libertad, Boxerbaum et al. [20] lo utiliza para generar la locomoción por peristalsis en un robot de estructura de malla y destacar también el proyecto Tetraspine desarrollado por Tietz et al. [21] que implementa controles de impedancia junto con CPG para generar diferentes tipos de marchas para desplazarse por distintos tipos de terrenos.

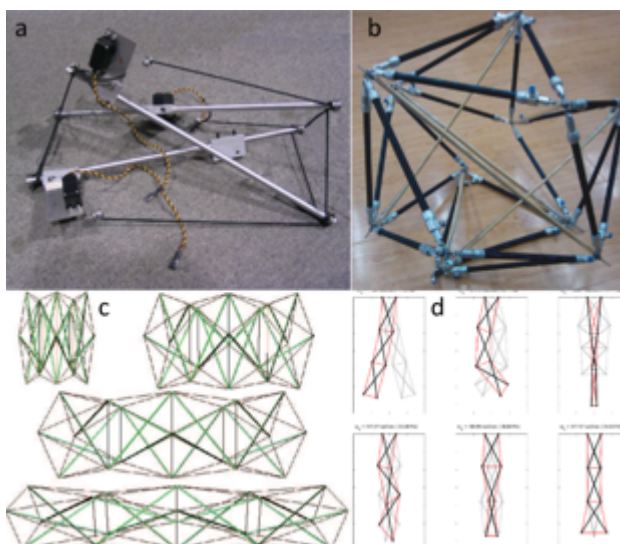


Figura 8. (a) Prototipo de 3 barras usado por Paul et al. (b) Prototipo utilizado por Wenjuan. (c) Estados de contracción de torre tensegridal trabajado por Skelton et al. (d) Moored utiliza una estructura de tensegridad bionspirada en la aleta de una manta raya. Imágenes tomadas de [13], [14], [17] y [18].

Los generadores centrales de patrones (CPG, por sus siglas en inglés) son circuitos neurales que se encuentran tanto en invertebrados como en animales vertebrados que pueden producir patrones rítmicos de actividad neural al recibir entradas rítmicas.



Figura 9. Simulación y prueba de robot con locomoción por peristalsis trabajado por Boxerbaum et al. Imágenes tomadas de videos de evidencia citados en [20].

Teniendo en cuenta los ejemplos anteriores y sus distintas formas de control para su locomoción, además de los grados de libertad de los que su diseño pueda dotarles, el uso de materiales blandos o suaves se puede considerar al momento de pensar en que materiales se conformará el robot. Robots con cuerpos suaves hechos de polímeros electroactivos, electroquímicos o desde materiales que pueden encontrarse en materiales comúnmente disponibles, como mallas de nylon, papel y cuerdas [22].



Figura 10. Izq. robot blando golpeado por un martillo mientras se desplaza. Der. brazo robótico flexible similar a un pulpo, compuesto por una funda trenzada accionada por resortes SMA. Imágenes tomadas de [22], [7].

V. Conclusiones

Un problema en la enseñanza de hoy en día es la formación en la que se ha dejado de cuestionar, de dudar en las afirmaciones brindadas por los docentes; el fomento a la curiosidad sobre el mundo que nos rodea ha sido enterrado para dar paso a la glorificación de la sumisión, a recibir información e imitar procesos de manera mecánica sin comprender la lógica que hay detrás. Por ello considero que una buena práctica docente en todo nivel es verificar y reafirmar los conocimientos de los estudiantes antes de seguir construyendo nuevas ideas sostenidas en poco más que la neblina de la memoria, además de mostrar el origen de lo que se está enseñando como formación cultural y medio de inspiración.

Agradecimientos

JAP, EGR agradecen el soporte económico recibido por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN) a través del programa BEIFI y CONACyT.

MMM, JCHL agradecen el soporte económico recibido por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN) y de los programas EDI y COFAA del IPN, así como del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

Referencias

1. R. B. Fuller (**November.1962**) *Tensile-integrity structures*.United States Patent 3063521.
2. K. D. Snelson (**Feb. 16, 1965.**) *Continuous tension, discontinuous compression structures*.U. S. Patent 3 169 611
3. Pugh (**1976**)*An Introduction to Tensegrity*. University of California Press, Berkeley. E.N. Armendáriz y P.C. Carbo y C.A. Hernández y J. López y E. Martínez y E. Rocha y J.A.
4. Rodríguez (**2014**) *Ingeniería bioinspirada*. OmniaScience Monographs
5. J. M. Benyus (**1998**) *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. First ed, Harper Collins Publishers Inc., NY
6. D. Rus and M.T. Tolley (**2015**) *Design, fabrication and control of softrobots*.*Nature*. 521
7. Laschi, C. and Cianchetti, M (**2014**) *Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control*.*Front. Bioeng. Biotechnol*, 2, 3
8. Y. Bar-Cohen, D. Hanson, A. Marom (**2009**) *Introduction*. In: *The Coming Robot Revolution*. Springer, New York, NY.
9. W. Du, S. Ma, B. Li, M. Wang and S. Hirai (**2014**) *Dynamic simulation for 6-strut tensegrity robots*.*IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)* Hailar, 2014, pp. 870-875.
10. Luo, J. Wang and H. Liu (**2017**) *Four-bar tensegrity robot based on ADAMS simulation*.*IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)* Takamatsu, 2017, pp. 1463-1468.

11. V. Böhm, T. Kaufhold, I. Zeidis, and K. Zimmermann (**May 2017**) *Dynamic analysis of a spherical mobile robot based on a tensegrity structure with two curved compressed members*. *Archive of Applied Mechanics*. 87(5):853-864.
12. V. SunSpiral, A. Agogino and D. Atkinson (**september 2015.**) *Final Report Phase II Super Ball Bot-Structures for Planetary Landing and Exploration for the NASA Innovative Advanced Concepts (NIAC) Program*. NASA Ames Research Center Intelligent Systems Division. Moffett Field, CA
13. Paul, J.W. Roberts, H. Lipson, and F.J.V. Cuevas (**January 2005.**) *Gait production in a tensegrity based robot*. in *Advanced Robotics*. ICAR'05. Proceedings., 12 th International Conference on
14. W. Du, S. Ma, B. Li, M. Wang and S. Hirai (**Oct. 2016.**) *Force Analytic Method for Rolling Gaits of Tensegrity Robots*. in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. vol. 21, no. 5, pp. 2249-2259
15. Iscen, K. Caluwaerts, J. Bruce, A. Agogino, V. SunSpiral and K. Tumer (**May 2015**) *Learning Tensegrity Locomotion Using Open-Loop Control Signals and Coevolutionary Algorithms*. in *Artificial Life/web* vol. 21, no. 2, pp. 119-140
16. Iscen, A. Agogino, V. SunSpiral, and K. Tumer (**July 6-10, 2013.**) *Controlling Tensegrity Robots through Evolution*. in *proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference/web (GECCO 2013)*, Amsterdam, The Netherlands
17. M. Masic and R. E. Skelton (**2004**) *Open-loop control of class-2 tensegrity towers*. in *Proceedings of the 11th Smart Structures and Materials Conference*. volume 5383, pages 298-308, Bellingham, WA, USA. International Society for Optical Engineering (SPIE).
18. K.W. Moored, III, S.A. Taylor, and H. Bart-Smith (**March 2011**) *Optimization of a Tensegrity Wing for Biomimetic Applications*. *Proceedings of SPIE*. 6173:617313, .B.T. Mirletz, P. Bhandal.
19. R.D. Adams, A.K. Agogino, R.D. Quinn, and V. SunSpiral (**2015**) *Goal Directed CPG-Based Control for Tensegrity Spines with many Degrees of Freedom Traversing Irregular Terrain*. *Soft Robotics*. 2(4): 165-176
20. A.S. Boxerbaum, A.D. Horchler, K.M. Shaw, H.J. Chiel, and R.D. Quinn (**September 2011**) *A controller for continuous wave peristaltic locomotion*. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pages 197-202
21. B.R. Tietz, R.W. Carnahan, R.J. Bachmann, R.D. Quinn, and V. Sun-spiral (**July 2013**) *Tetraspine: Robust Terrain Handling on a Tensegrity Robot Using Central Pattern Generators*. in *IEEE/ASME Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE.

22. R.V. Martinez, A.C. Glavan, C.Kelinger, A.I. Oyetibo, and G. Whitesides (2014) *Soft Actuators and Robots that are Resistant to Mechanical Damage*. *Advanced Functional Materials* 24:3003-3010