

# Sistema Macro & Micro robótico para aplicaciones médicas

## Macro & Micro Robotics System for Medical Applications

León-Rodríguez Hernando<sup>1</sup>

### Resumen



Los robots para aplicaciones médicas en la macro y micro escala son la combinación de la tecnología de fabricación tradicional con tecnología de MEMS (micro electro-mechanical systems) sumadas con tecnologías como nano-tecnología, ingeniería biomédica y ciencia de los Materiales. Los robots en la macro escala para aplicación médica son dispositivos adaptados y desarrollados para hospitales traídos de tecnologías de aplicaciones industriales. Sin embargo, para minimizar la cirugía, el dolor y el sangrado en el paciente, los micro robots es una tecnología emergente que sería capaz de llegar con micro-cámaras, nano-sensores, y micro-manipuladores a áreas del cuerpo que no requerirán de cirugía sino utilizarán los orificios naturales del cuerpo. Este artículo se enfoca en una revisión bibliográfica de algunos Macro-Micro Robots Médicos que podrían ser parte del servicio de salud en un futuro cercano.

**Palabras clave:** Sistemas robóticos ; aplicaciones médicas

### Abstract



Robots for medical applications at the macro and micro scale are the combination of traditional manufacturing technology with MEMS technology (micro electromechanical systems), such as nanotechnology, biomedical engineering and materials science. The robots at the macro scale for medical application are adapted devices from industrial technologies applications into hospital. However, to minimize surgery pain and bleeding in the patient, microscopic robots are an emerging technology that can be reached with micro cameras, nano sensors-actuators and micro manipulators in depth areas of the body. The future micro-robot surgery will use the natural holes to reach the illness place into the body. This article focuses on a bibliographic review of some Macro-Micro Medical Robots that can be part of the health service in the near future.

**Key words:** Robotics System; Medical Applications

1. This research was supported by Chonnam National University – Korea, Robot Research Initiative and by the Nueva Granada Military University of Colombia, Inv-Ing-2106. Agradecimientos a la Universidad El Bosque por el apoyo y la invitación a la participar como ponente en el congreso de robótica Runibot-2017. Correspond author e-mail: hernando.leon@unimilitar.edu.co

Recibido / Received: Septiembre 8 de 2017 Aprobado / Approved: Octubre 11 de 2017

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación Científica y Tecnológica terminada.

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad Militar Nueva Granada

Autor para comunicaciones / Author communications: hernando.leon@unimilitar.edu.co

*El autor declara que no tiene conflicto de interés.*

## Introducción

Hoy en día, los robots médicos son los cirujanos no humanos de alto rendimiento, con una precisión inigualable y la capacidad de trabajar sin fatiga. Estos robots son ampliamente utilizados en diversas prácticas médicas, incluyendo procedimientos quirúrgicos de gran dificultad y velocidad, donde han revolucionado completamente la eficiencia y la calidad de los servicios de atención de salud en varias partes del mundo.

El primer robot médico conocido utilizado por la industria médica fue en 1985, cuando el robot PUMA 560 colocó una aguja para una biopsia cerebral utilizando la guía CT (Computed tomography) [1]. Años más tarde, el PROBOT de Imperial College de Londres ayudó a los médicos a realizar cirugía de próstata en un paciente. [2] Desde entonces, se han realizado estudios persistentes sobre sistemas robóticos para uso específico en el cuidado de la salud por parte de investigadores médicos.

Uno de los robots más famosos es el sistema quirúrgico Da-Vinci; [3] este utiliza un método de cirugía mínimamente invasivo (MIS) frecuentemente maniobrado para reparación de válvulas cardíacas, prostatectomías, remoción de tumores abdominales y procedimientos ginecológicos. [3] El cirujano maniobra los brazos robóticos del sistema mientras mira una pequeña cámara endoscópica de alta resolución es insertada a través de una incisión. La capacidad articulada de la muñeca del robot supera la amplitud de movimiento de la mano humana, permitiendo el movimiento en un espacio mucho más pequeño. Esto genera en el paciente incisiones más pequeñas, menos sangre, dolor y trauma y un tiempo de curación más rápido que la cirugía regular.

Varios robots médicos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones quirúrgicas, desde la neurocirugía a la radiocirugía, incluso en rehabilitación, pediatría y ortopedia. En Israel, un robot miniatura llamado ViRob fue desarrollado con el fin de arrastrarse a través del cuerpo humano, localizar un tumor, y tratarlo con medicamentos. Su tamaño era solamente de un milímetro de largo y cuatro milímetros de extremo a extremo, el Vibot utiliza pequeños brazos controlados por un campo electromagnético para propulsar su camino a través de diferentes cavidades del cuerpo humano, en busca de tumores mortales para ser tratados. [4]

En muchas partes del mundo, los hospitales utilizan robots para tareas que requieren precisión y rapidez, como la entrega y recuperación de suministros y la mezcla y dispensación de medicamentos. En Europa y los EE.UU., un robot se utiliza para mezclar y medir los medicamentos, específicamente los utilizados en la quimioterapia. [5] Los errores humanos en este proceso pueden ser mortales, ya que el menor error en la mezcla podría poner en peligro tanto a los pacientes como al personal del hospital. El uso de un robot así elimina la necesidad de cálculo manual y reduce en gran medida la posibilidad de error humano.

Otros robots médicos patrullan hospitales como enfermeras y miembros del personal. En un centro médico de Maryland, un robot llamado Gower navega por los pasillos, usa el servicio de ascensores, abre las puertas, entrega los medicamentos de los pacientes en la estación de enfermeras y ayuda a entregar los medicamentos a sus pacientes más rápido y en forma autónoma. [6]

En los hospitales de Asia, los pacientes en la unidad de cuidados intensivos son visitados regularmente por robots de ruedas con monitores de computadora para la cabeza (avatars). Estos robots son controlados de forma remota por médicos desde un centro de mando en otro piso, lo que permite a los médicos verificar simultáneamente a sus pacientes y leer sus signos vitales sin tener que abandonar su puesto. En las áreas de EE.UU. con escasa cobertura de especialistas, la telemedicina que utiliza la misma tecnología permite a especialistas remotos hacer los procedimientos iniciales de evaluación del paciente como la gestión del accidente cerebrovascular y/o dar diagnósticos efectivos. Usando una cámara de vídeo de un robot, un neurocirujano puede observar y hablar con los pacientes y revisar sus tomografías computarizadas y otros resultados de laboratorio, incluso si están a cientos de kilómetros de distancia. [7]

Por otro lado Los robots son cada vez más populares en las farmacias. El McKesson ROBOT-Rxm, por ejemplo, almacena y dispensa dosis únicas de medicamentos para hospitales enteros. Los farmacéuticos simplemente introducen recetas en una computadora, mientras que el robot recolecta la dosis escaneando y los códigos de barras de los medica-

mentos. Finalmente, el robot saca las medicinas y realiza un seguimiento de todo para asegurar que el medicamento correcto llegue al paciente adecuado. [8]

Otro dispositivo similar es el IntelliFill iv, un robot que puede llenar hasta 60 jeringas de fármacos específicos para el paciente cada hora. También permite asegurar que el medicamento correcto en la dosis adecuada llegue al paciente adecuado. [10] Esto ha llevado a los hospitales a computarizar los sistemas para órdenes de prescripción y utilizar dispositivos que automatizan el proceso de llenado de la prescripción médica. [10]

Claramente, aunque el elemento del tacto humano es vital en la industria médica, algunas áreas parecen mejor ser dejadas a las máquinas. El objetivo de estos robots, después de todo, es mejorar la salud y la vida de los seres humanos.

## Robótica médica a la macro-escala

Los robots a la macro escala utilizados en medicina principalmente están enfocados en el desarrollo de intervenciones quirúrgicas, como ejemplo: cirugía cardíaca [11], gastro-intestinal [12] o de neurocirugía [13]. Estos dispositivos permiten al cirujano realizar el procedimiento de una manera más precisa minimizando el dolor y la recuperación del paciente; son llamadas MIS (minimal invasion surgery) o cirugías mínimamente invasivas [40] (ver figura 1).

**Figura 1.** Cirugía mínimamente invasiva vs cirugía tradicional. [40]



Este tipo de cirugía MIS permite que en la práctica el paciente tenga menos riesgo de infección en la herida, menos tiempo en quirófano y un tiempo de recuperación

más corto; además, de las ventajas estéticas. Sin embargo el cirujano pierde el contacto directo tanto visual como táctil durante la operación y se hace necesario un riguroso aprendizaje de las técnicas quirúrgicas con los sistemas robóticos.

Entre las técnicas para minimizar el error tecnológico en los sistemas tele-quirúrgicos de MIS, el cirujano practica con antelación los movimientos que serán ejecutados por el robots; además de usar alternativas como sistema de control compartido donde uno o varios cirujanos ejecutan movimientos estables mientras el otro cirujano controla todo el proceso.

El dispositivo robótico quirúrgico usado en los hospitales en la actualidad es el sistema Davinci (ver figura 2); fue diseñado y fabricado por la empresa norteamericana Intuitive Surgical [14], aprobado por la FDA (Food and Drugs Administration) en el año 2000 [15]. Tiene el objetivo de potenciar las capacidades y habilidades del cirujano y consta de un robot articulado de 4 DOF que trabaja en el paciente llevando en sus brazos una cámara de alta definición y los instrumentos de trabajo de MIS como son: pinzas, inyector, succión, tijeras, biopsias entre otras.

**Figura 2.** sistema robótico de cirugía Davinci [14]



La otra parte del sistema DaVinci es la consola donde el cirujano controla todos los movimientos de cada una de las pinzas y con ayuda de imagen tridimensional puede ampliar el campo de visión al interior del cuerpo.

El sistema recibe las órdenes en tiempo real, reproduciendo los movimientos de la mano, la muñeca, pies, dedos del cirujano y en la actualidad está en desarrollo el movimiento de los párpados. [14]

## Micro robots en aplicaciones médicas

La micro-robótica es una tecnología emergente en la última década; está inspirada en la locomoción biológica de organismos a la micro escala. [16] la micro-robótica se ha enfocado principalmente en soluciones de aplicación médica, específicamente por ejemplo: minimizar el tamaño de la cirugía (minimal Invasión Surgery) [17] [18], entrega de medicina en órganos específicos del cuerpo (drug delivery system) [19] [20], navegación por el aparato circulatorio [21] [22] y/o digestivo [23], entre otros.

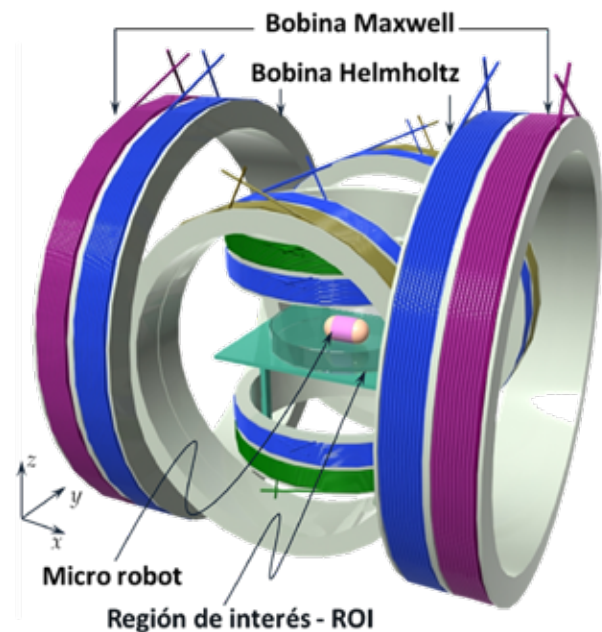
Debido a la necesidad de miniaturización de los componentes y los desafíos asociados a la fabricación de los sistemas robóticos en la micro escala, su construcción se fundamenta en la tecnología MEMS. [24] Pero esto significa que los sistemas micro-robóticos carecen de la complejidad de sus equivalentes en la escala convencional. Las leyes físicas que predominan en la micro escala son principalmente las fuerzas superficiales [25] [26]; en tal razón, el almacenamiento de energía que principalmente está basado en el volumen ejemplo: las baterías, es menos eficaz, dando como resultado que la mayoría de los sistemas micro-robóticos emplean suministro de potencia externo. [27]

Entre los mecanismos de actuación más comunes está el accionamiento electrostático [28], sistema electromagnético [29], laser control [30] [31], propulsión biológica basada en bacterias [32] [33], entre otros métodos prometedores de futuro. En el caso de los sistemas electromagnéticos, presentado a continuación, existen diversos tipos de configuración de actuadores, entre los más recocidos están: los pares de bobinas circulares de Helmholtz y Maxwell [34] [35], las bobinas concentradas o campo magnético no-uniforme (OctoMag) [36] [37] y las bobinas modificadas geoméricamente para ampliar la región de interés (Saddle Coils) [38] [39].

## Sistema actuador Electromagnético para Micro-robots

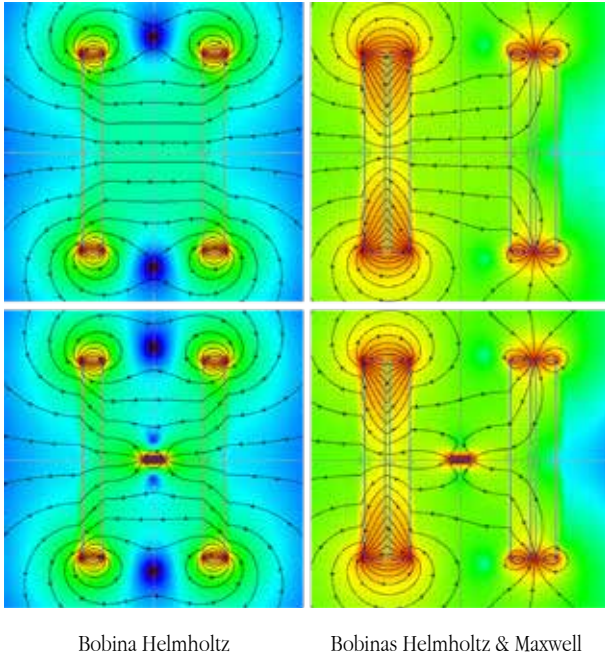
El sistema actuador consiste en 3 pares de bobinas electromagnéticas alineadas en los 3 ejes cartesianos. Estos pares de bobinas son perpendiculares y estacionarias, compuestas por 3 bobinas Helmholtz y 3 bobinas Maxwell, que permiten reproducir movimientos en el micro-robot de 6 grados de libertad. (Ver figura 3)

**Figura 3.** Diagrama sistema actuador electromagnético para micro-robots



Esencialmente, la bobina Helmholtz al energizarse produce un flujo magnético uniforme en su parte intermedia o región de interés (ver figura 4: arriba-izquierda), esto permite que al colocar un micro-robot se pueda alinear en dirección y orientación producida por el campo magnético externo (ver figura 4: abajo-izquierda). Por otro lado, la bobina de Maxwell permite generar un flujo magnético gradiente-uniforme que al combinarse con la bobina de Helmholtz permitirá producir la fuerza de propulsión del micro robot. (Ver figura 4: derecha-abajo).

**Figura 4.** Simulación del comportamiento individual y combinado de las bobinas Helmholtz y Maxwell. (Vizi-mag software)

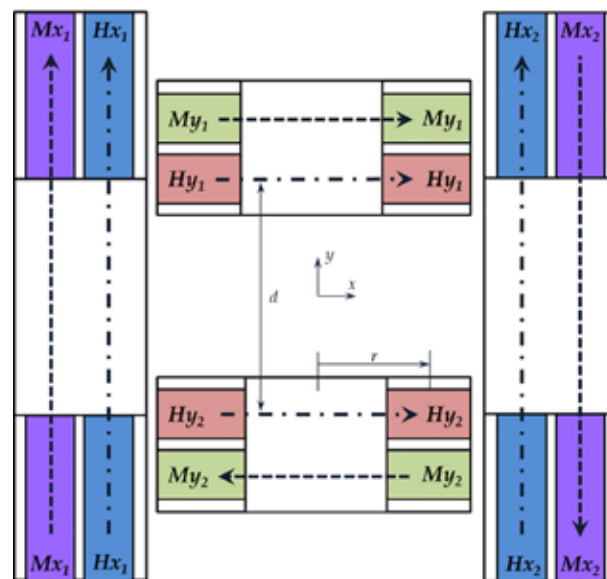


Fundamentalmente y analizando el comportamiento del actuador electromagnéticos (EMA) en forma bidimensional (*plano x-y*); el diagrama esquemático de la figura 3 nos muestra la configuración en los 3 ejes cartesianos de los diferentes pares de bobinas del sistema actuador. La figura 5 nos muestra las bobinas  $Hx_1-Hx_2$  y  $Hy_1-Hy_2$  representadas en el diagrama como bobina Helmholtz en los ejes y cuadrantes cartesianos positivo y negativo. Adicionalmente las bobinas  $Mx_1-Mx_2$  y  $My_1-My_2$  correspondientes a las bobinas Maxwell de igual configuración en ejes y cuadrantes. Finalmente, la figura 3 muestra la dirección de la corriente en cada bobina; donde al ser controlada independientemente permite el direccionamiento del campo magnético en la trayectoria del eje  $x$  y el eje  $y$ .

La Bobina de Helmholtz consiste en el arrollamiento de 2 bobinas independientes con iguales condiciones geométricas, diámetro del alambre y numero de vueltas. Estas bobinas a ser colocadas en forma paralela producen un flujo magnético uniforme (figura 4 derecha-arriba). La distancia teórica  $d$  entre los dos arrollamientos para

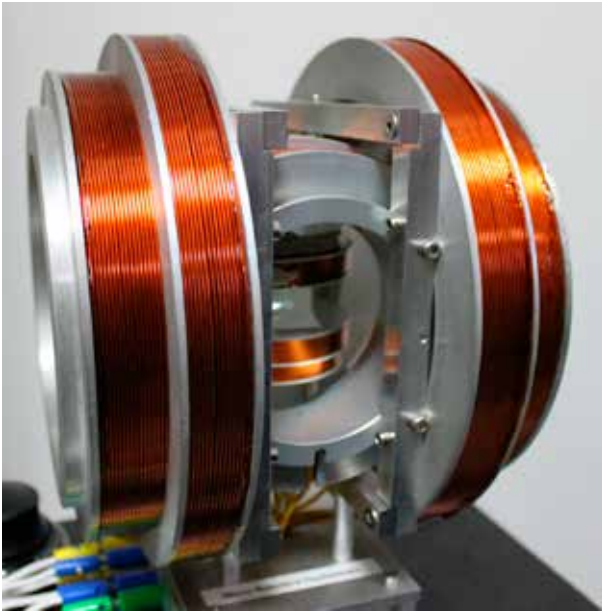
producir el flujo magnético uniforme ideal debe ser igual al radio  $r$  de las bobinas  $Hy_1$  y  $Hy_2$  o  $Hx_1$  y  $Hx_2$ . (ver figura 5). En conclusión, la bobina Helmholtz cumple con la relación:  $d=r$ . Para el caso de la corriente que fluye a través de la bobinas, esta debe tener la misma dirección y la misma intensidad; dando como resultado las líneas de campo magnético uniforme en medio de los dos arrollamientos. Este flujo magnético es definido como un vector que al ser controlado en dos pares de bobinas Helmholtz, permite obtener cualquier dirección de orientación en el *plano x-y* que será reproducido por el micro-robot.

**Figura 5.** Diagrama esquemático del sistema actuador electromagnético (EMA) plano  $x-y$ .



En forma similar la bobina de Maxwell se compone de dos arrollamientos que cumplan con las mismas condiciones de geometría, diámetro del alambre y numero de vueltas. Estos dos arrollamientos al ser colocados paralelamente deben cumplir con la relación  $d=\sqrt{3}r$ . Dónde:  $d$  es la distancia entre los dos arrollamientos y  $r$  el radio del solenoide. Adicionalmente, en la bobina de Maxwell la corriente aplicada a los dos solenoides debe ser la misma intensidad, pero la dirección del flujo de corriente debe ser opuesta. La densidad del flujo magnético producido por la bobina Maxwell es gradiente-uniforme generado a los largo de los ejes  $x, y$ . Este flujo magnético también se define en forma vectorial y es quien produce la impulsión del micro robot.

**Figura 6.** Actuador Electromagnético para micro-robots



El diseño mecánico del actuador electromagnético es acondicionado para obtener el mayor espacio y posición de la región de interés (ROI), donde los diámetros de los pares de bobinas Helmholtz y Maxwell son dife-

rentes debido a la restricción geométrica y posición de cada bobina, pero ambas satisfacen la definición teórica. Finalmente, para obtener el mismo flujo magnético de las bobinas Helmholtz y Maxwell en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  esto es posible mediante dos alternativas: la primera opción es mantener constante la corriente eléctrica y calcular el número de vueltas y diámetro del alambre de las bobinas. La segunda, es mantener un diámetro constante en el espesor del alambre, obteniendo, un número de vueltas definido para cada par de bobinas; resultando, en la variación y control de la corriente eléctrica en cada par de bobinas. Este último fue aplicado para este actuador (ver figura 6). Adicionalmente, el núcleo de las bobinas fue manufacturado en aluminio debido a que permite una buena conductividad térmica y permeabilidad.

## Resultados y experimentación

Desde la teoría y la simulación numérica, se confirmó que la dirección del micro-robot está regulada por las dos bobinas Helmholtz y el movimiento del micro-robot por los dos pares de bobinas de Maxwell. Mediante experimentos, los movimientos del micro-robot accionado por el sistema electromagnético (ver figura 6) donde fueron validados.

**Figura 7.** Alineación del micro-robot bobinas Helmholtz, plano x-z.



Dirección deseada: 0°



Dirección deseada: 45°



Dirección deseada: 90°



Dirección deseada: 180°



Dirección deseada: 225°

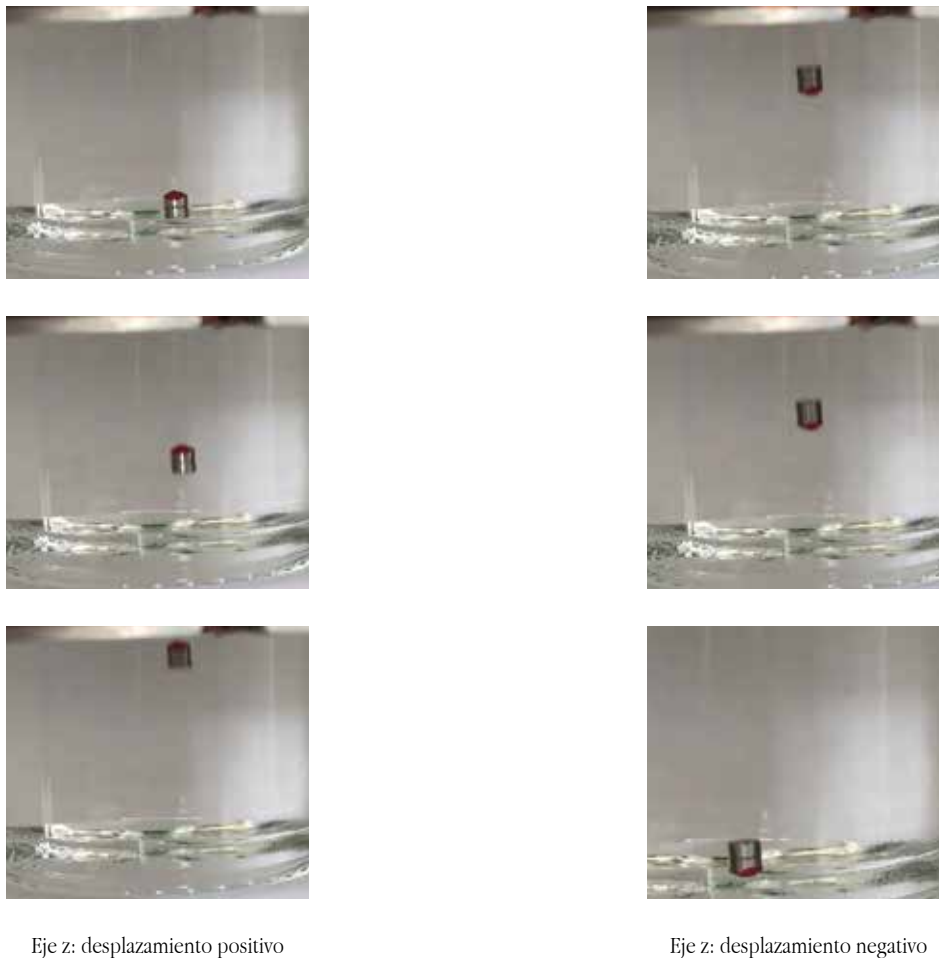


Dirección deseada: 270°

En primer lugar, controlando la corriente a la bobina Helmholtz la magnitud y la dirección del campo magnético fueron reguladas arbitrariamente. Por lo tanto, la dirección del campo magnético se modificó ajustando la relación del flujo de corriente para cada eje, donde el torque generado permite girar el micro-robot a la

dirección deseada. La Figura 7 se muestra los resultados experimentales de la rotación del micro-robot en 2 ejes. A través de estos experimentos, se validó que el micro-robot podría estar alineado en las direcciones deseadas (0, 45, 90, 180, 225 y 270) por los dos pares de Bobinas de Helmholtz.

Figura 8. Desplazamiento del micro-robot bobinas Helmholtz y Maxwell, Eje: z, 90o.



En segundo lugar, Combinado los pares de bobinas de Helmholtz y los pares de bobinas de Maxwell (ver figura 8) estos permitieron generar la fuerza de propulsión en la dirección alineada del micro-robot. El micro-robot puede moverse en varias direcciones deseadas a lo largo de los 3 ejes cartesianos. En conclusión, el micro-robot se alineó primero en la dirección deseada (figura 8; 90° eje z) por los dos pares de bobinas de Helmholtz y el desplazamiento lo genera los dos pares de bobinas de Maxwell resultando que el micro-robot se desplazó a lo largo de una trayectoria y dirección deseada.

## Conclusiones

En el futuro, las cirugías y los dispositivos de aplicaciones médicas estarán asociados a los sistemas robóticos y serán parte de los procedimientos quirúrgicos. Por otro lado, la tecnología en micro robótica permitirá liderar parte de estos procesos de manipulación quirúrgica de mínima invasión o mediante la utilización de los orificios naturales buscando reducir el dolor en el paciente y reduciendo su tiempo de recuperación.

## Bibliografía

- [1] B Davies; A review of robotics in surgery; Proc Instn Mech Engrs Vol 214 Part H; IMechE 2000
- [2] S J Harris, F Arambula-Cosio, Q Mei, R D Hibberd, B L Davies, J E A Wickham, M S Nathan, B Kundu, The Probot—an active robot for prostate resection; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine Vol 211, Issue 4, pp. 317 – 325; 1997
- [3] Ashutosh Tewari, James Peabody, Richard Sarle, Guruswami Balakrishnan, Ashok Hemal, Alok Shrivastava, and Mani Menon; Technique of Da Vinci Robot-Assisted Anatomic Radical Prostatectomy; 2002, ELSEVIER SCIENCE INC.
- [4] Microbotmedical, “Virob, Life in motion”; © Microbot Medical Inc., 2017; [En línea]. Disponible en: <http://www.microbotmedical.com/>; [Accedido: 20-may-2018]
- [5] Stephanie Lemmo Ham, Ehsan Atefi, Darcy Fyffe, Hossein Tavana; Robotic Production of Cancer Cell Spheroids with an Aqueous Two-phase System for Drug Testing; . J. Vis. Exp. (98), e52754, doi:10.3791/52754 (2015).
- [6] Shilpa Pandey, Nitisha Payal, Aarti Sharma; Robots and Robotically Assisted Surgeries; International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET); Volume 1 Issue 5 pp 294-298 August 2012
- [7] Narendra Nathoo, M.D., Ph.D., M Cenk Çavuşlu, Ph.D., Michael A. Vogelbaum, M.D., Ph.D., Gene H. Barnett, M.D.; In Touch with Robotics: Neurosurgery for the Future, Neurosurgery, Volume 56, Issue 3, 1 March 2005, Pages 421–433.
- [8] McKesson; ROBOT-Rxm; © 2018 McKesson Corporation [En línea]. Disponible en: <http://www.mckesson.com/>; [Accedido: 20-may-2018]
- [9] J.A. Osborne; ForHEalth Technologies Inc, USA, IntelliFill iv; Disponible en: <https://www.gerpac.eu/intellifill-i-v/>; [Accedido: 20-may-2018]
- [10] Mary Inguanti; The IntelliFill iv for Health Technology; PP&P, 2006.
- [11] Falk, Volkmar MD; Diegler, Anno MD, PhD; Walther, Thomas MD; Autschbach, Rudiger MD, PhD; Mohr, Friedrich W. MD, PhD; Developments in robotic cardiac surgery; Current Opinion in Cardiology; November 2000 - Volume 15 - Issue 6 - pp 378-387.
- [12] Jesús Moreno Sierra, Carlos Núñez Mora, M<sup>a</sup> Isabel Galante Romo, Sara Prieto Nogal, José López García Asenjo, y Angel Silmi Moyano.; Prostatectomía Radical Asistida por Robot Da Vinci®: Un Año de Experiencia en el Hospital Clínico san Carlos; Laparoscopia y Robótica Arch. Esp. Urol., 61, 3 (385-396), 2008.
- [13] Chris S. Karas, E. Antonio Chiocca; Neurosurgical robotics: a review of brain and spine applications; Journal of Robotic Surgery; March 2007, Volume 1, Issue 1, pp 39–43.
- [14] Davinci Surgical System, Intuitive Surgical 2018; Disponible en: <https://www.intuitivesurgical.com/>; [Accedido: 20-may-2018]
- [15] Fink Densford; Intuitive Surgical wins FDA not for daVinci X platform; Disponible en: <http://www.massdevice.com/>; [Accedido: 30-may-2017]
- [16] MinJun Kim, Anak Agung Julius, U Kei Cheang; Microbiorobotics, Biologically Inspired Micro-scale Robotic Systems, Elsevier, 2017.
- [17] Bradley J. Nelson, Ioannis K. Kaliakatsos, and Jake J. Abbott; Microrobots for Minimally Invasive Medicine; Institute of Robotics and Intelligent Systems, ETH Zurich, Zurich, Switzerland; 2010.
- [18] Stefano Fusco, Franziska Ullrich, Juho Pokki, George Chatzipirpiridis, Berna Ozkale, Kartik M Sivaraman, Olgac, Ergeneman, Salvador Pane & Bradley J Nelson; Microrobots: a new era in ocular drug delivery; Institute of Robotics and Intelligent Systems, ETH Zurich, Zurich, Switzerland; 2014.
- [19] Van Du Nguyen, Ji-Won Han, Young Jin Choi, Sunghoon Cho, Shaohui Zheng, Seong Young Ko, Jong-Oh Park, Sukho Park; Active tumor-therapeutic liposomal bacteriobot combining a drug (paclitaxel)-encapsulated liposome with targeting bacteria (Salmonella Typhimurium); Sensors and Actuators B 224 (2016) 217–224.
- [20] Chungseon Yu, Juhyun Kim, Hyunchul Choi, Jongho Choi, Semi Jeong, Kyoungrae Cha, Jong-oh



- Park, Sukho Park; Novel electromagnetic actuation system for three-dimensional locomotion and drilling of intravascular microrobot; *Sensors and Actuators A* 161 (2010) 297–304.
- [21] Sukho Park, Kyoungrae Cha, and Jongoh Park; Development of Biomedical Microrobot for Intravascular Therapy; *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 7, No. 1 (2010).
- [22] Zoltán Nagy, Raymond Oung, Jake J. Abbott, and Bradley J. Nelson; Experimental Investigation of Magnetic Self-Assembly for Swallowable Modular Robots; *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 2008.
- [23] Bruce R. Donald, Christopher G. Levey, Igor Paprotny, and Daniela Rus; *Simultaneous Control of Multiple MEMS Microrobots*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [24] Michel Wautelet; Scaling laws in the macro-, micro- and nanoworlds; *European Journal of Physics*, *Eur. J. Phys.* 22 (2001) 601–611.
- [25] E. M. Purcell; *Life at Low Reynolds Number*; Harvard University, Cambridge, Massachusetts; 1976.
- [26] Jake J. Abbott, Zoltán Nagy, Felix Beyeler, and Bradley J. Nelson; *Robotics in the Small*; *IEEE Robotics & Automation Magazine*; 2007
- [27] Chytra Pawashe, Steven Floyd, and Metin Sitti; Multiple magnetic microrobot control using electrostatic anchoring; *Applied Physics Letters* 94, 2009.
- [28] Gwangjun Go, Hyunchul Choi, Semi Jeong, Cheong Lee, Bang Ju Park, Seong Young Ko, Jong-Oh Park, Sukho Park; Position-based magnetic field control for an electromagnetic actuated microrobot system; *Sensors and Actuators A* 205 (2014) 215–223.
- [29] Villangca, Mark Jayson; Palima, Darwin; Banas, Andrew Rafael; Glückstad, Jesper; *Light-driven micro-tool equipped with a syringe function*; *Light: Science & Applications*; 2016.
- [30] Fumihito Arai, Toshiaki Endo, Ryuji Yamuchi, Toshio Fukuda; 3D 6DOF Manipulation of Micro-object Using Laser Trapped Microtool; *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; 2006.
- [31] Kathrin E. Peyer, Li Zhang and Bradley J. Nelson; Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications; *Nanoscale*, 2013, 5, 1259.
- [32] Li Zhang, Jake J. Abbott, Lixin Dong, Kathrin E. Peyer, Bradley E. Kratochvil, Haixin Zhang, Christos Bergeles, and Bradley J. Nelson; Characterizing the Swimming Properties of Artificial Bacterial Flagella; *Nano Letters*, 2009 Vol. 9, No. 10, 3663-3667.
- [33] K. Berk Yesin, Philipp Exner, Karl Vollmers, and Bradley J. Nelson; *Design and Control of In-Vivo Magnetic Microrobots*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [34] Orphée Cugat, Jérôme Delamare, and Gilbert Reyne; *Magnetic Micro-Actuators and Systems (Magmas)*; *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, No. 5, 2003.
- [35] Michael P. Kummer, Jake J. Abbott, Bradley E. Kratochvil, Ruedi Borer, Ali Sengul and Bradley J. Nelson; OctoMag: An Electromagnetic System for 5-DOF Wireless Micromanipulation; *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 6, 2010.
- [36] Eric Diller, Joshua Giltinan, Guo Zhan Lum, Zhou Ye, and Metin Sitti; Six-Degrees-of-Freedom Remote Actuation of Magnetic Microrobots; *SAGE Journals*, Vol 35, Issue 1-3, 2016.
- [37] Semi Jeong, Hyunchul Choi, Seong Young Ko, Jong-Oh Park, and Sukho Park; Remote Controlled Micro-robots using Electromagnetic Actuation (EMA) Systems; *The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*; 2012.
- [38] Hyunchul Choi, Kyoungrae Cha, Jongho Choi, Semi Jeong, Seungmun Jeon, Gunhee Jang, Jong-oh Park, Sukho Park; EMA system with gradient and uniform saddle coils for 3D locomotion of microrobot; *Sensors and Actuators A* 163 (2010) 410–417.
- [39] Sung Jun Park, Seung-Hwan Park, Sunghoon Cho, Deok-Mi Kim, Yeonkyung Lee, Seong Young Ko, Yeongjin Hong, Hyon E. Choy, Jung-Joon Min, Jong-Oh Park & Sukho Park; New paradigm for tumor theranostic methodology using bacteria-based microrobot; *Nature Scientific Reports*; 2013
- [40] Castillo cesar, *Cirugía de mínima invasividad 2013*; Disponible en: <http://castillodelossantos.com>; ; [Accedido: 20-may-2018]

---

## El Autor



### **Hernando León-Rodríguez**

Hernando Leon Rodriguez awarded his Ph.D. (2008) in climbing and amphibious robot for none destructive testing en London South Bank University- England. Since 2008, he been working as a research and lecturer in several macro robots projects sponsor by Nueva Granada Military University in Colombia for industrial application. In 2013, he begins to research in micro robot in Chonnam National University in Korea; currently, his new research interests are bio-inspired micro robot and micromanipulation for biomedical applications.