

DEDOS PARA “GRIPPERS” ROBÓTICOS - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

RESUMEN

En este artículo se hace una revisión del estado del arte en el desarrollo de dedos mecánicos articulados para el desarrollo de *grippers*¹ o manos robóticas. Se hace un estudio de los mecanismos de transmisión de movimiento además de los actuadores requeridos para este tipo de proyectos.

PALABRAS CLAVES: Antropomorfo, anatomía, actuadores, robótica.

ABSTRACT

In this article a revision of the state-of-the-art in the development of mechanical fingers articulated for the development of grippers or robotic hands becomes. A study becomes of the mechanisms of movement transmission in addition to the actuators required for this type of projects.

KEYWORDS: *Anthropomorphic, anatomy, actuators, robotic.*

OSCAR F AVILES S

Ingeniero Electrónico, Especialista en Instrumentación Electrónica, estudiante de Maestría en sistemas Automáticos de producción UTP, Profesor Universidad Militar Nueva Granada
oaviles@umng.edu.co

PEDRO LEON SIMANCA

Ingeniero Mecánico, Especialista en Automatización, estudiante de Maestría en sistemas Automáticos de producción UTP, Profesor Universidad de Antioquia
psimanca@udea.edu.co

GABRIEL CALLE T.

Ingeniero Mecánico, PhD, Profesor Universidad Tecnológica de Pereira
gcalle@utp.edu.co

1. INTRODUCCION

Este documento muestra los avances y las técnicas utilizadas en el diseño y construcción de manos robóticas. La mayor fuente de información consultada son artículos científicos que se encuentran disponibles en la Internet, además se realiza un estudio y descripción breve de los mecanismos y actuadores para la transmisión de movimientos en proyectos de este tipo.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Los Robots son utilizados para realizar tareas de campo importantes como la manipulación de material peligroso, inspección en plantas nucleares y la exploración espacial entre otras. Es importante realizar diseños que tengan arquitectura abierta o que sean modulares con el fin de que estos sean de fácil adaptabilidad, Farritor[10]. En nuestro diario vivir, la mano humana es el órgano principal para la recepción y reacción a los estímulos táctiles, los cuales son la guía de nuestro repertorio de funciones manuales, sin embargo, la integración de una colección de sensaciones análogas en una plataforma robótica propone un gran desafío tecnológico, para el cual el uso de software de simulación para el diseño mecánico, y el uso de herramientas matemáticas, puede minimizar el

tiempo en el desarrollo de una determinada estructura o de un determinado sistema, Banks[1], Maeno[2]. Cunha[20] indica que dentro de la estructura mecánica que se implementa en el diseño de *grippers* los actuadores rotatorios son uno de los componentes mas importantes usados para la generación de movimiento, los cuales junto con un buen diseño mecánico trata de reproducir la acción de la mano humana y la muñeca. Darío[18] dice que el antropomorfismo² es uno de los factores principales que se deben observar en proyectos de prótesis para los miembros superiores o en el desarrollo de grippers que asemejen lo más exactamente posible la mano humana, y en consecuencia, la reproducción de los movimientos y las formas naturales de los dedos llegan a ser muy importantes. Un gran problema constructivo se relaciona con la manera del cómo serán desarrollada y fabricada la transmisión de los movimientos para las articulaciones, ver figura 1, Doersam[27], Mason [3].

Wilkinson[22], figura 2, implementó un mecanismo que utiliza un tejido artificial como tendón extensor y el cual junto con los músculos emula bastante bien un dedo humano y su funcionamiento. Las implementaciones del tendón extensor son poco usadas debido a su complejidad y la dificultad para realizar el control. Este trabajo proporciona una comprensión de la funcionalidad del mecanismo del tendón extensor para que se puedan

¹ Grippers: [angl] Elemento que simula la mano humana utilizado como efector final y que tiene por objeto la manipulación de objetos [34,35]

Fecha de recepción: 31 Enero de 2005

Fecha de aceptación: 14 Marzo de 2005

² Antropomorfismo: Dar calidades humanas a las cosas que no son humanas

extraer las características cruciales que necesitan ser imitadas para construir una mano artificial.

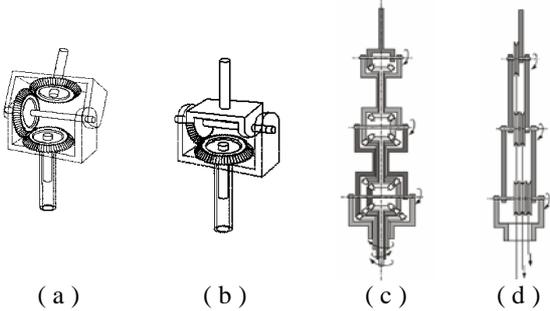


Figura 1. Mecanismo usando engranajes cónicos que proporcionan la transmisión del movimiento de la articulación *i* a través de las articulaciones anteriores (b) Mecanismo usando engranajes cónicos que aplica el movimiento en la propia articulación (c, d) Comparación entre los mecanismos con transmisión por engranajes cónicos versus transmisión por cables y poleas. Simulando un dedo con tres grados de libertad [20]

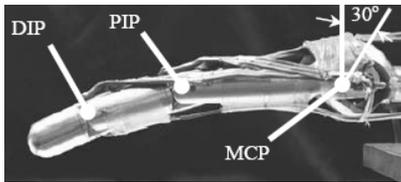


Figura 2. Ejemplos de algunas posiciones logradas con la emulación del mecanismo extensor [21]

Banks[1,15,17] y Pollard[26] describen que la mano humana puede servir como paradigma para una interfaz robótica con el ambiente, así, su morfología ha mantenido activo el interés por las investigaciones en manipuladores y en particular en los efectores finales de tipo *gripper*, donde su funcionalidad sigue siendo una referencia para la realización de nuevos diseños. Uno de los desafíos de esta línea de investigación es una emulación de anatomía humana, lo que a menudo puede resultar embarazoso y complicado de llevar a cabo, la fabricación y mando de un solo dedo robótico inspirado por la anatomía humana, debe ser un buen inicio para el diseño de un efector final apropiado para un robot humanoide, figura 3.

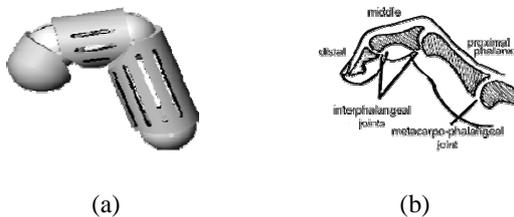


Figura 3. Analogía entre un diseño mecánico de un dedo y su respectivo análogo fisiológico. a) Ensamble en SolidWorks® de un dedo robótico, los sensores los actuadores no están incluidos b) Analogía, huesos y articulaciones de un dedo humano

De otro lado, la morfología provee lo necesario para la investigación en manipulación y su funcionalidad como

prueba patrón para una ingeniería sofisticada. Muchos de los constructores de grippers apuntan a alcanzar la destreza de la mano a través del diseño de múltiples dedos. De manera tal que una aproximación antropomórfica expone la complejidad de la emulación de la mecánica y control de un simple dedo. Banks[17] muestra el desarrollo de un dedo el cual usa transmisión de movimiento por medio de cables y el cual esta dotado de sensores para dotar de capacidad sensorial al prototipo, ver figura 3. Incluso manos que son antropomórficas pueden diferir dramáticamente de la mano humana en la habilidad de asir y manipular los objetos, los mecanismos de transmisión de fuerza en los dedos del robot son generalmente simétricos sobre la flexión/extensión como un tendón, manejado en un dedo mecánico puede perfeccionarse para la capacidad de transmisión de fuerza equivalente al dedo del índice humano. Pollard[16],[25]

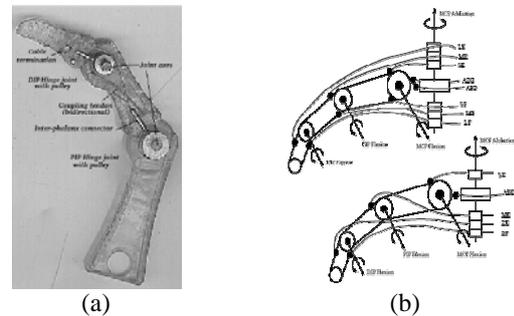


Figura 4. (a) Mecanismo para la transmisión de movimiento por medio de cables y poleas [17], (b) Mecanismo de tendones de dedos robóticos [16].

Por otro lado, la compañía de Robótica “Shadow”[6] muestra el desarrollo de un manipulador diestro de uso general el cual incorpora las prácticas más interesantes en actuadores, y diseño de electrónica modular. Este desarrollo tiene aplicaciones en áreas domésticas, médicas, de asistencia, etc. La mano desarrollada proporciona un rango completo de movimientos, con los niveles y destreza que se acercan a la mano del humano. Esta mano robótica utiliza actuadores eléctricos lo cual permite tener una buena ejecución en la planificación de trayectorias y además es controlada en tiempo real con el fin de minimizar los requerimientos del hardware, figura5.

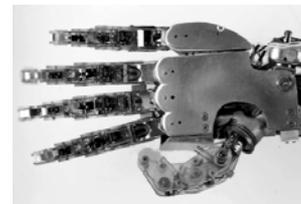


Figura 5. Diseño de la mano desarrolla por CLAWAR [6]

En la figura 6 se observa el una imagen del trabajo realizado por Borst[9] quien desarrolla una mano que es

de gran velocidad en las articulaciones, además permite manipular pequeños objetos.



Figura 6. Ejemplo de mano robótica usada para una aplicación de tocar piano. [9]

Land[13] indica que en los diseños de manos o mecanismos antropomórficos se hace muy importante el uso de equipos de alta tecnología como máquinas de prototipaje rápido para realizar modelos de piezas antes de su fabricación final además el uso de herramientas de realidad virtual son importantes a la hora de desarrollar o mejorar nuevos dispositivos, Iskikawa[11] muestra el desarrollo una mano robótica que puede usarse como prótesis pero en este trabajo hay muchas restricciones y demandas que deben satisfacerse, como son por ejemplo: el tamaño y el peso, se observa allí, figura 7, un mecanismo, ajustable que transmite el movimiento y que usa un tendón (de alambre), donde, para la realización de una tarea determinada los cambios se hacen dependiendo del tamaño de la carga, esto con el fin de permitir a los dedos moverse más rápidamente bajo cargas livianas y más lentamente con más torque bajo las cargas pesadas.



Figura 7. Mano desarrollada con alambres usados como tendones para accionar el mecanismo [11]

Laliberty [19] muestra un *gripper* adaptable y reconfigurable que es versátil y fácil de controlar, este gripper tienen tres dedos y cada uno de los dedos tiene tres falanges por lo que su adaptabilidad se obtiene de manera sencilla. La documentación reportada muestra además que es importante realizar modelos que se ajusten al sistema real con el fin de decidir cuales son las mejores estrategias para la realización del control, Land[13].



Figura 8. Gripper mecanico desarrollado por Laliberté (2002)

En el trabajo de Cuadrado[14], el aporte en cuanto a la modelación como mecanismo de la fisiología de la mano, allí se indica como son las restricciones de movimiento que se obtienen en las articulaciones con lo que se puede hacer una representación del sistema como una cadena cinemática abierta en donde la representación de Denavit es útil para la posterior implementación de las estrategias de control, figura 9.

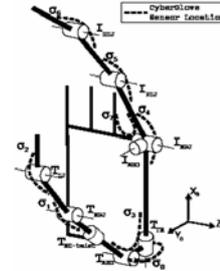


Figura 9. Modelo Cinemático de un gripper de dos dedos [14]

3. ACTUADORES

Un actuador – transductor, es un elemento que convierte un tipo de energía (eléctrica, hidráulica o neumática), causando un efecto de movimientos lineares o angulares en un sistema automatizado [46,41]. Los Mecanismos en manos robóticas están compuestos por motores o materiales compuestos los cuales pueden ser clasificados de acuerdo a su principio de funcionamiento, además son clasificados en convencionales y no convencionales, los primeros se basan en principios electromagnéticos mientras que los otros son basados en fenómenos físicos relacionados directamente a la composición atómica del material, por ejemplo el caso de uniones metálicas, materiales piezoeléctricos, compuestos químicos, etc.

A. Actuadores Convencionales

Los actuadores más utilizados en el desarrollo de manos robóticas son: micromotores DC con escobillas, los cuales son acoplados a mecanismos reductores con el fin de aumentar el torque y reducir la velocidad angular, como el principio de funcionamiento es por efecto electromagnético necesitan un buen mantenimiento debido al desgaste de las escobillas, una ventaja grande radica en que el avance en las técnicas de manufactura hacen que se consigan tamaños bastante reducidos lo que facilita el acomodamiento en diferentes tipos de grippers con el fin de aumentar los grados de libertad que se pueden obtener. Otros actuadores eléctricos son los llamados *brushless*³ los cuales se basan en principios de conmutación de estado sólido, como no utilizan escobillas son libres de mantenimiento lo que alarga su vida útil, dentro de los que usan efecto electromagnético aparece también los llamados músculos ratificales hidráulicos los cuales utilizan una micro bomba accionada por un motor

³ [Angl] sin escobillas

DC con la cual se pueden alcanzar presiones de 0.6 MPa (Lee et al, 2000).

B. Actuadores no Convencionales

Dentro de este grupo están los que utilizan efecto piezoeléctrico⁴, los cuales tienen la característica de tener una relación peso/potencia alta, son de tamaño reducido y generan un alto torque de salida (comparados con motores eléctricos), pero son de costo elevado. Un ejemplo de este tipo de efecto es empleado en motores ultrasónicos (USM⁵) los cuales utilizan vibraciones mecánicas en la región ultrasónica (por encima de 20Khz) como fuente de accionamiento. [Naoki et al 2000].

Las Aleaciones con memoria de forma (SMA⁶) constan de uniones metálicas y se caracteriza por asumir fases o formas diversas sobre la acción de diferentes temperaturas, pero pueden recuperar su forma original cuando son enfriadas. [TiNi Alloy Company, 2000⁷], el uso de este material en forma de hilos, la relación resistencia/peso, la relación fuerza/área hace que este material pueda ser utilizado para sustituir motores debido a su menor masa, un inconveniente es la baja relación de cambio de longitud (acortamiento) del material debido al bajo cambio de temperatura con el ambiente (entre 3 y 8%), uno de los materiales mas utilizados es el Nitinol (NiTi).

El Polímero Gel contráctil, es compuesto por un material capaz de sufrir una deformación razonable mediante la aplicación de un estímulo externo, que puede ser térmico, químico o eléctrico y que tiene la particularidad de presentar grandes cambios de volumen, como ejemplos de este tipo de polímeros se tienen el PAA (Poli ácido acrílico), NIPA (N-isopropilacrilamida) y el PAM (Poli-acrilamida) [http://www.ai.mit.edu/projects/muscle/pubs.html]

4. MECANISMOS DE TRANSMISIÓN

A. Mecanismo de barras:

La figura 12, es un mecanismo de barras sencillo de implementar pero que limita los movimientos, ya que la flexión se produce al tiempo en las 3 articulaciones. Por esta razón, la maniobrabilidad de una mano se reduce en un gran porcentaje. Este tipo de mecanismo es muy utilizado para construir prótesis robóticas.

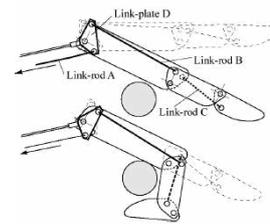


Figura 12. Mecanismo de barras rígidas [18]

B. Mecanismo con motor en cada junta:

Es muy utilizado en manos robots. Consiste en ubicar motores pequeños o micromotores cada una de las articulaciones rotacionales de una cadena cinemática, es una estrategia de diseño funcional, pero que conlleva a aumentar costos por el número de motores que se debe utilizar y además de incrementar el peso del mecanismo.

C. Transmisión por poleas:

Para la transmisión por poleas las cuerdas de transmisión de todas las poleas deben ir unidas en un punto fijo a las respectivas poleas para así evitar deslizamientos y lograr que el movimiento se transmita, este tipo de transmisión aplicado a un dedo mecánico se muestra en la figura 13. En la figura 13b se observa un esquema que permite observar el funcionamiento de este mecanismo.

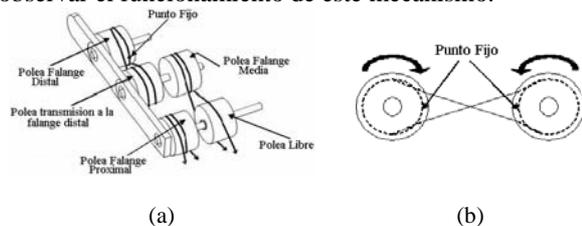


Figura 13. Descripción del sistema de poleas para la generación de movimientos en los mecanismos de los dedos: (a) Mecanismo de transmisión por poleas, b) Funcionamiento por poleas

La ventaja de este sistema de transmisión radica en la reducción en el peso de la mano además de que es fácil de implementar. La transmisión mediante poleas es como sigue:

Cuando el eje de una máquina motriz (motor) gira a una velocidad de rotación n , una polea que se encuentra solidaria, enchavetada, atornillada o soldada, al mismo, también gira a la misma velocidad de rotación n , y la velocidad tangencial v en la periferia de la polea dependerá del radio de la misma. Esta polea puede transmitir, por fricción o a través de una correa o cuerda, su movimiento a otra polea que esté montada sobre el eje de otro mecanismo receptor del movimiento, el cual según sea la relación de transmisión, podrá adquirir menor, igual o mayor velocidad de rotación que el primero. La polea que transmite el movimiento se denomina *motora* o *conductora*, en tanto que la que recibe el movimiento recibe el nombre de *conducida*.

⁴ El efecto piezoeléctrico consiste en la aparición de una polarización eléctrica en un material a deformarse bajo la acción de un esfuerzo [Pallas Areny, "Sensores y Acondicionadores de señal", Marcombo, 2001]

⁵ [Angl] del ingles Ultrasonic Motors

⁶ [Angl] del ingles Shape Memory Alloy

⁷ http://www.tinialloy.com

5. CONCLUSION

Si bien los desarrollos reportados muestran un avance significativo en el diseño e implementación de manos antropomórficas es claro que esta área tiene muchos campos de aplicación que no se dejan solo al campo de la salud sino también al área industrial, el conocimiento de las diferentes técnicas de generación de movimiento así como la transmisión del mismo es de vital importancia a la hora de proponer un nuevo mecanismo. Para el caso de estudio, manos robóticas los actuadores convencionales, no convencionales y los mecanismos de transmisión se pueden agrupar como indica la tabla 1, además los resultados prácticos y computacionales, muestran la importancia de estos desarrollos para aplicaciones industriales. Con base en la tabla 1 se verifica que las opciones para la implementación de grippers o manos robóticas son variadas, por ello es necesario tener claro cual es la aplicación final para así tener en cuenta características como peso, volumen, espacio de trabajo, requerimientos de torque, precio, disponibilidad tecnológica, etc.

Actuador convencional	Micromotores DC
	Motores sin escobillas (brushless)
	Musculos artificiales (hidraulicos)
	Motores a pasos
Actuador no convencional	Efecto piezoelectrico
	USM
	SMA
	Polímeros
Mecanismos de Transmisión	Barras
	Motor en cada articulación
	Poleas

Tabla 1. Actuadores y mecanismos de transmisión

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Jessica Lauren Banks, "Design and Control of an Anthropomorphic Robotic Finger with Multi-point Tactile Sensation", Master of Science thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2001. disponible en: <http://www.ai.mit.edu>

[2] Takashi Maeno and Tomoyuki Kawamura, "Geometry Design of an Elastic Finger-Shaped Sensor for Estimating Friction Coefficient by Pressing an Object", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003, pp. 1533-1538

[3] M.T. Mason, J.K. Salisbury, Jr, "Robot Hands and the Mechanics of Manipulation", The MIT Press, 1985

[4] Lauren S. Shook and David L. Akin, "Evaluation of Various Hand Controllers for Use by a Space Suited Subject", Copyright © 2001 Society of Automotive Engineers, Inc.

[5] Grippers, disponible en Copyright © 2001 Society of Automotive Engineers, Inc.

[6] Shadow Robot Company1, "Design of a Dextrous Hand for advanced CLAWAR applications". 251 Liverpool Road London ENGLAND

[7] Rémy KOCIK, Yves SOREL, "A methodology to design and prototype optimized embedded robotic systems", INRIA Rocquencourt - Domaine de Voluceau BP105

[8] Adam Green, Mohammad Haq, Alvin So, "Glove-Controlled Robotic Hand", Microprocessor Systems Lab, Spring 2002

[9] Ch. Borst, M. Fischer, S. Haidacher, H. Liu and G. Hirzinger, "DLR Hand II: Experiments and Experiences with an Anthropomorphic Hand", German Aerospace Center – DLR, Institute for Robotics and Mechatronics, 82230 Wessling, Germany.

[10] Shane Farritor, Steven Dubowsky, "On Modular Design of Field Robotic Systems", Department of Mechanical Engineering, University of Nebraska, Lincoln, NE 68588 U.S.A.

[11] Yasuhiro Iskikawa, Wen Wei Yu, Hiroshi Yokoi, Yukinori Kakazu, "Development of robot hands with an adjustable power transmitting mechanism", Intelligent Engineering Systems Through Neural Networks, C.H.Dagli, et al. (Eds.), Vol. 10, pp. 631-636, ASME Press, ISBN:0-7918-0161-6, 2000.

[12] Panagiotis Stergiopoulos, Philippe Fuchs and Claude Laugeau, "Design of a 2-Finger Hand Exoskeleton for VR", Grasping Simulation", Robotics Center-Ecole des Mines de Paris, 60 bd St-Michel, 75272 Paris Cedex 06, France

[13] N. Lan and T. Murakata, "A realistic human elbow model for dynamic simulation", Alfred E. Mann Institute for Biomedical Engineering Dept. of Biomedical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089

[14] J. Cuadrado, M.A. Naya, Ceccarelli, G. Carbone, "An Optimum design procedure two finger grippers a case of study", Departamento de Ingeniería Industrial II, Universidad de La Coruña, Mendizábal s/n, 15403 Ferrol, Spain, Laboratory of Robotics and Mechatronics DiMSAT, Università di Cassino Via Di Biasio 43, 03043 Cassino, Italy.

[15] Jessica Lauren Banks, "Anthropomorphic Robotic Finger Platform Based on Shape Memory Alloy", Artificial Intelligence Laboratory Massachusetts Institute Of Technology Cambridge, Massachusetts 02139, disponible en: <http://www.ai.mit.edu>

[16] Nancy S. Pollard and Richards C. Gilbert, "Tendon Arrangement and Muscle Force Requirements for Humanlike Force Capabilities in a Robotic Finger", disponible en: www.2.cs.cmu.edu/~nsp/papers/icra02.hands.pdf

[17] Jessica L Banks, "Novel design and control of a Anthropomorphic robotic finger", disponible en: www.ai.mit.edu/people/jessical/proposal2.ps

- [18] Paolo Dario, Cecilia Lashi, Maria Chiara Carroza, "An integrated approach for the design and development of a grasping and manipulation system in humanoid robotics", disponible en: www.arts.sssup.it/download/papers/2000_IROS.pdf
- [19] Thierry Laliberté, Lionel Birgleny, and Clement M. Gosselin, "Underactuation in robotic grasping hands", *Machine Intelligence & Robotic Control*, Vol. 4, No. 3, 1–11 (2002), disponible en: <http://www.robot.gmc.ulaval.ca/~birgle00/Shared/MIROC03.pdf>
- [20] Fransérgio L. da Cunha, Vladimir I. Dymnikov, "Detalhes construtivos de uma prótese antropomorfa para membros superiores – um estudo das transmissões e acionadores", XV congresso brasileiro de engenharia mecânica, 1999 Sao Paulo. Disponible en: <http://www.sel.eesc.sc.usp.br/labciber/fcunha/COBEM99.pdf>
- [21] Cecilia Lashi, Paolo Dario, Maria Chiara Carrozza, y otros, "Grasping and manipulation in humanoid robotics", disponible en: http://www.arts.sssup.it/download/papers/2000_Humanoids.pdf
- [22] David D. Wilkinson, Michael Vande Weghe, Yoky Matsuoka, "An Extensor Mechanism for an Anatomical Robotic Hand", *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003*, disponible en: http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/wilkinson_david_d_2003_1/wilkinson_david_d_2003_1.pdf
- [23] Gwenda Sharp OTR and Dave Thompson PT, "Biomechanics of the hand", disponible en: <http://moon.ouhsc.edu/gsharp/namics/hand.htm>
- [24] Christopher J. Hasser, Mark R. Cutkosky, "System Identification of the Human Hand Grasping a Haptic Knob", Presented at the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS 2002), part of IEEE Virtual Reality 2002 (IEEE-VR2002), Orlando, FL, 24-25 March 2002, IEEE Computer Society Press. Disponible en: http://www-cdr.stanford.edu/touch/publications/hasser_jevevr02.pdf
- [25] Weston B. Griffin, Ryan P. Findley, Michael L. Turner and Mark R. Cutkosky, "Calibration and Mapping of a Human Hand for Dexterous Telemanipulation", ASME IMECE 2000 Conference Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems Symposium disponible en: http://www-cdr.stanford.edu/touch/publications/griffin_asme00.pdf
- [26] Nancy S. Pollard and Richards C. Gilbert, "Tendon Arrangement and Muscle Force Requirements for Humanlike Force Capabilities in a Robotic Finger", disponible en: www-2.cs.cmu.edu/~nsp/papers/icra02.hands.pdf
- [27] Th Doersam, et al, "A Study of multifingered gripper control".
- [28] Daniel Audi Piera, "Como y cuando aplicar un robot industrial", Marcombo editores, 1988
- [29] Jose Ma Angulo Usategui, Susana Romero Yesa, Ignacio Angulo Martinez, "Microbotica", Paraninfo, 2000
- [30] John J Craig, "Introduction to robotics, mechanics and control", Adisson Wesley, 1986.
- [31] Jose Ma Angulo Usategui, "Robótica practica, tecnología y aplicaciones", Paraninfo, 1996.
- [32] SRI International, Gerry B Andeen, "Robot Design Handbook", McGraw Hill Company, 1988.
- [33] Shimon V Nof, "Handbook of industrial Robotics", John Willey & Sons, 1985.
- [34] Mark W spong, M Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control", John Willey & Sons, 1989.
- [35] Krishna C Gupta, "Mechanics and control of robots", Springer 1997.
- [36] Nakamura Y, "Advanced Robotics".
- [37] Michell P Groover, Mitchell Weis, Roger N Nagel, Nicholas G Odrey, "Industrial Robotics, technology, programming and applications", McGraw Hill Inc. 1986.
- [38] Douglas R Nalcom Jr, "Robotics, an introduction", Delmar publishers, 1988.
- [39] Jorge Angeles, "Fundamentals of robotics Mechanical systems, theory methods and algorithms", Springer.
- [40] Rene Cailliet MD, "Síndromes dolorosos: Mano", Ed. el manual moderno, 1994.
- [41] Centro Nacional de Actualización Docente, "Mecatrónica III", Mexico 1989.
- [42] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano, "Modelling and control of robot manipulators", McGraw Hill Company, 1996.
- [43] F.L. Lewis, C.T. Abdallah, D.M. Dawson, "Control of Robot Manipulators", McGraw Hill Publishing, 1993.
- [44] Zancolli, "Anatomía quirúrgica de la mano". MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
- [45] Paolo Dario, Cecilia Lashi, Maria Chiara Carroza, "A Human-like Robotic manipulation System Implementing Human Models of Sensory-Motor Coordination", disponible en: <http://www.arts.sssup.it/download/papers/>
- [46] Senai, Glossário de Mecatrônica e Processos de Manufatura", Departamento regional de São Paulo Escola SENAI "Armando de Arruda Pereira", Edição para Mercosur.