



## DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN DE UN DEDO ARTICULADO ANTROPOMORFO CON UN GRADO DE LIBERTAD PARA UNA MANO ROBÓTICA

MARCO CECCARELLI

NÉSTOR EDUARDO NAVA RODRÍGUEZ\*

JUAN MANUEL JÁUREGUI BECKER\*

JORGE EDUARDO PARADA PUIG\*

GIUSEPPE CARBONE

LARM: Laboratorio di Robotica e Meccatronica

DiMSAT-Università degli Studi di Cassino

Via G. Di Biasio 43, Cassino (FR), Italia

e-mail: ceccarelli@unicas; carbone@unicas.it

**Resumen:** El objetivo de este artículo es el diseño de un nuevo prototipo de dedo robótico con 1 grado de libertad con funcionamiento económico y sencillo que puede usarse como un módulo para una mano antropomórfica. Particular atención ha sido prestada al diseño del mecanismo articulado que transmite la potencia entre la entrada motriz y las falanges de un dedo. El diseño de este mecanismo de 1 grado de libertad ha sido logrado analizando el agarre cilíndrico humano para conseguir aquellas dimensiones que permitan una transmisión de movimiento antropomórfico, similar a la del dedo humano. Pruebas experimentales se han llevado a cabo en manos humanas y en un prototipo de dedo antropomorfo. Los resultados experimentales muestran la fiabilidad práctica del prototipo como módulo para una mano robótica de tres dedos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El agarre humano posee una sorprendente flexibilidad e incomparable destreza, tal que ha llamado la atención de muchos investigadores, [1-13]. El estudio del agarre humano como modelo ha llevado a la construcción de innovadores pero costosos prototipos de dedos, para ser utilizados como partes funcionales de robots antropomórficos. Ejemplos de referencia pueden ser los dedos en Stanford/JPL hand, [5], Utah/MIT hand, [6], TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand, [7], DLR Hand, [9], Manus Colobi, [8], BUAA/Beijing University four-fingered hand, [9].

La mayoría de los prototipos disponibles tienen un número alto de grados de libertad (dofs), un control complejo y un alto costo. Recientemente se han desarrollado estudios en el LARM, Laboratorio de Robótica y Mecatrónica, en Cassino para diseñar un prototipo antropomórfico de dedo y de mano de sencillo y económico funcionamiento, [10-13].

Este artículo trata el diseño de un nuevo prototipo de dedo articulado con un grado de libertad, económico y de funcionamiento sencillo, que tiene el tamaño de un dedo índice humano. Este prototipo puede usarse como módulo para una mano robótica antropomorfa. Particular atención ha sido considerada para el diseño del mecanismo articulado que transmite la potencia entre la entrada motriz y las falanges de un dedo. Caracterización y validación experimental se han desarrollado con manos humanas y con el prototipo que ha sido construido como resultado del estudio del agarre humano.

\* Alumnos de la Universidad de Los Andes en Mérida (Venezuela), en visita en el LARM durante el Año Académico 2001-02 para el desarrollo de su proyecto final de carrera.

## 2. LA MANO HUMANA

El diseño de órganos de agarre tiene como fuente natural de inspiración la mano humana. El objetivo de los investigadores es la emulación de las habilidades mostradas por la mano en su interacción con el ambiente externo, [1].

La mano humana se conecta a la muñeca a través de la palma y esta dotada de veinte grados de libertad accionados por cerca de cuarenta músculos, [3]. La estructura ósea de la mano se muestra en Fig.1(a). En Fig.1(b) se muestra el efecto de la orientación de la muñeca en la fuerza de agarre. Cada dedo está compuesto por tres falanges, a excepción del dedo pulgar, que solo tiene dos. El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos y puede realizar los movimientos de cierre y rotación (Circonducción), debido a la gran movilidad de su metacarpo, como es mostrado en Fig.2(a), [1]. Esto permite variar la orientación del plano en que se desarrolla el movimiento de doblado y extensión del dedo pulgar, propiedad a través de la cual es posible oponer el dedo pulgar a los otros dedos. Con el término abducción (Abduction) se entiende el movimiento de salida del dedo del eje del brazo, como es mostrado en Fig.2(a). El movimiento de Extensión/Abducción (Extention/Abduction) es la capacidad de extensión del pulgar hacia la parte exterior y flexión hacia el interior de la palma. El término Oposición (Opposition) se define como la capacidad de unión de las puntas del pulgar y el meñique. La Aducción/Abducción (Adduction/Abduction) es la capacidad de acercamiento y alejamiento del pulgar de la palma, cuando ambos se encuentran en un mismo plano. La gran cantidad de músculos y juntas que están presentes en la mano permiten esta gran variedad de configuraciones de agarre. En 1919, Schlesinger desarrolló una clasificación de la taxonomía para el estudio de la destreza de las manos humanas y la planificación de prótesis que está comentado en [2]. Este autor agrupó en seis categorías las estrategias de agarre de la mano humana: agarre cilíndrico (Cylindrical Grasp), de punta (Tip), de gancho (Hook or Snap), de palma (Palmar), esférico (Spherical Grasp) y de lado (Lateral), como es mostrado en la Fig.2(b), [2].

## 3. EXPERIENCIAS DE AGARRE CON LA MANO HUMANA

El estudio de las características cinemáticas y las fuerzas que aplica la mano humana cuando ejerce un agarre, constituye una fase preliminar de fundamental importancia para la construcción de un dispositivo de agarre con dedos articulados.

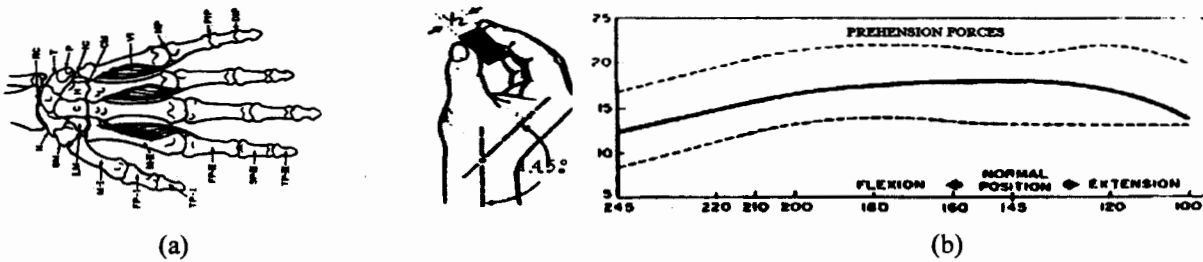


Fig.1 La mano humana: (a) estructura ósea; (b) efecto de la orientación de la muñeca en la fuerza de agarre, [2].

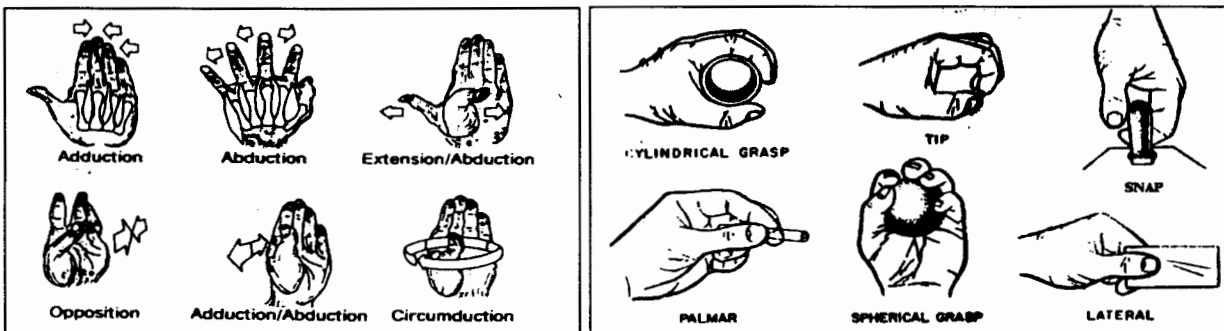


Fig.2 La mano humana: (a) movimientos característicos de los dedos; (b) configuraciones de agarre, [2].

Por esta razón se ha realizado un estudio del agarre que realiza la mano humana. Las pruebas han sido realizadas por 5 personas, todos hombres entre 22 y 27 años con diferentes dimensiones de falanges del dedo índice, como es ilustrado en la Tabla 1. La mano ha sido dotada de seis sensores de fuerza FSR (Force Sensing Resistor) modelo 150 CP12, [14] de bajo costo. La posición relativa entre los sensores se ha conseguido a través de un guante de látex de uso domestico, estos son colocados en los dedos humanos con cinta plástica no adhesiva. No obstante, algunas experiencias se han realizado sin el uso del guante de látex por comodidad del ejecutante durante el desempeño de la prueba. Los sensores permiten medir la fuerza del contacto entre los dedos y el objeto durante la realización del agarre. La calibración de los sensores es realizada ajustando la señal de salida de ellos, a un polinomio de tercer grado, con el uso de pesos con valores de 10 N, 4 N y 0 N, debido a que este es el rango en el que se encontraran las fuerzas a medir.

Para la adquisición, elaboración y presentación de la señal proveniente de los sensores, se ha utilizado un instrumento virtual en Labview, [15], utilizado en experiencias anteriores en el LARM, [11]. También se ha utilizado una tarjeta electrónica desarrollada en el LARM que permite la alimentación a los seis sensores, así como la conexión eléctrica entre ellos y la tarjeta de adquisición de datos AT-MIO 16E-2, [16]. Para la realización de las pruebas se han seguido ciertas pautas, de manera de estandarizar aspectos relacionados a la posición de los objetos y procedimientos de agarre, tal como se muestra en las Fig. 4 y 5. Esta estandarización permite una base de datos homogénea, sobre la cual es posible realizar el análisis de las pruebas. En la Fig. 6 se muestra la evaluación promedio de la experiencia con el agarre de un Cilindro de Madera de dimensiones  $d=6,19$  cm;  $h=12,10$  cm y peso de 125 gramos.

Tabla 1. Estadística de las manos utilizadas para la prueba de agarre con la mano humana.

Persona	Falange 1 [mm]	Falange 2 [mm]	Falange 3 [mm]
1	25,7	22,5	24,1
2	27,4	23,5	22,1
3	26,2	19,4	28,8
4	27,1	19,2	25,1
5	28,3	23,1	25,3
<i>Valor medio</i>	<b>26,94</b>	<b>21,54</b>	<b>25,08</b>



Fig.3 Mano dotada de sensores y posición de los sensores.

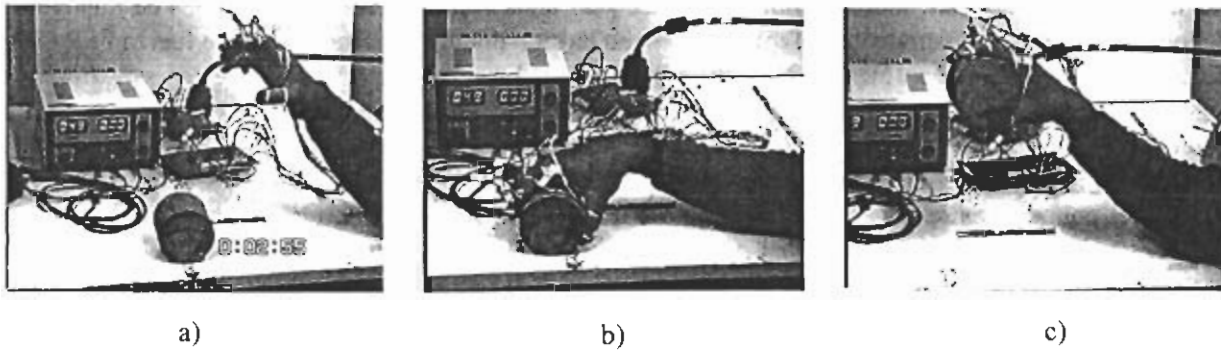


Fig.4 Posición de la mano en el agarre de un cilindro de madera: (a) Posición inicial; (b) Posición de agarre; (c) Posición final.

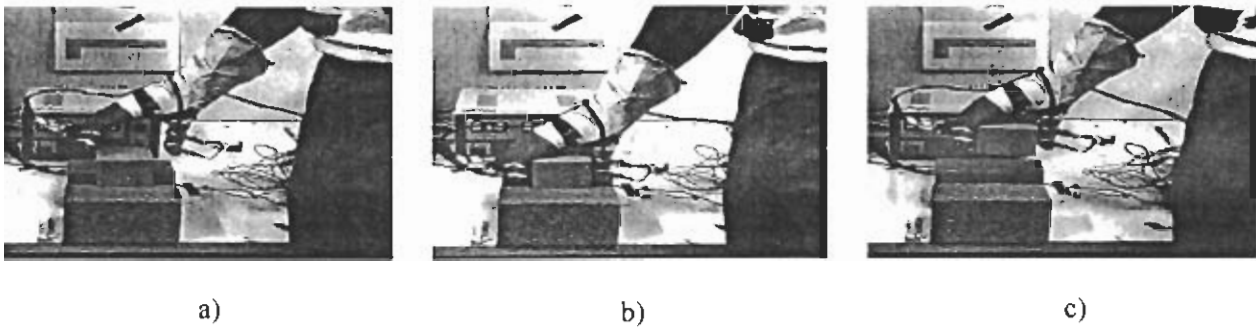


Fig.5 Posición del cuerpo en el agarre de un cubo de madera:(a) Posición inicial; (b) Posición de agarre; (c) Posición final.

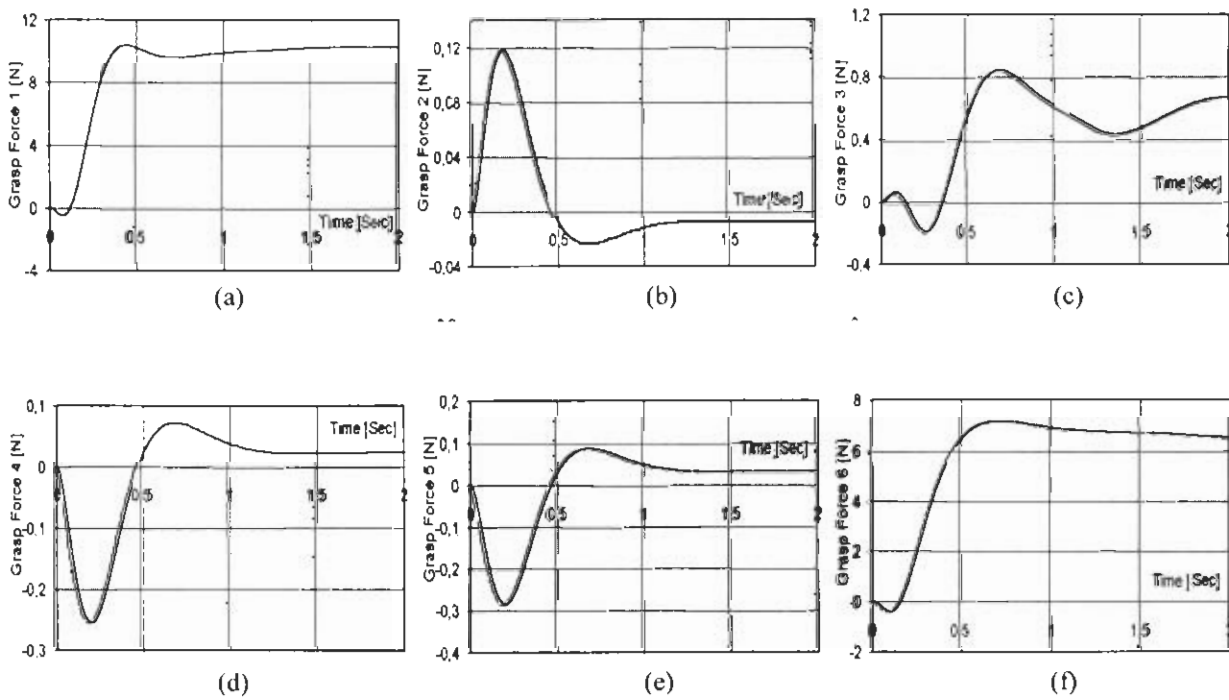


Fig. 6 Fuerzas promedio registradas en los sensores durante la prueba de agarre de un cilindro de madera: (a) sensor 1, (b) sensor 2, (c) sensor 3, (d) sensor 4, (e) sensor 5, (f) sensor 6.

#### 4. DISEÑO DE UN NUEVO DEDO ARTICULADO A 1 GRADO DE LIBERTAD

Se han usado los resultados de las pruebas experimentales con la mano humana para definir la cinemática de un mecanismo articulado, cuyo tamaño y movimiento de cierre sean los más similares a los de un dedo índice humano. En particular, se han usado las dimensiones promedio de las falanges del dedo del índice que se encuentran en Tabla 1 y que se definen como las distancias  $A_0A_1$ ,  $A_1D_1$  y  $D_1E_1$  en el esquema cinemático de la Fig.7. Se ha decidido actuar la primera falange correspondiente a los eslabones  $A_0A_1A_2$ , conectándola directamente a un actuador. Las otras falanges son actuadas por un mecanismo articulado que se conecta con la falange anterior. De esta manera, cualquier movimiento de la primera falange actuará la segunda falange  $A_1B_1D_1$  a través del eslabón  $B_0B_1$ . Semejantemente, cualquier movimiento de la segunda falange actuará la tercera falange  $D_1E_1C_1$  a través del eslabón  $A_2C_1$ . Esta solución ha sido considerada, ya que es económica y puede empotrarse en el cuerpo del dedo. Sin embargo, la síntesis dimensional de los mecanismos articulados ha sido desarrollada con consideraciones para obtener las proporciones de las transmisiones necesarias y evitar interferencias entre los diferentes eslabones para un movimiento antropomórfico de agarre [11].

Simulaciones en Inventor, [17], han sido desarrolladas para comprobar que el movimiento de cierre sea apropiado y para comprobar que no hay interferencia mecánica como se muestra en Fig.8. El esquema mecánico de un dedo que satisfaga los requisitos de diseño se muestra en la Fig.9(a). Además, en la Fig.9(b) se muestra un prototipo que ha sido construido en el LARM con la característica que el mecanismo se ha diseñado para quedarse dentro de las falanges. La dimensiones de este prototipo se encuentran en la Tabla 2.

#### 5. EXPERIENCIAS DE AGARRE CON EL DEDO ANTROPOMÓRFICO

Pruebas experimentales han sido desarrolladas con el prototipo que se encuentra en la Fig.9(b). Para estas experiencias se han utilizado los mismos sensores e instrumento virtual de LabView que han sido utilizados para las experiencias de agarre humano. En las Figs.10, 11 y 12 se muestran los valores de las fuerzas registradas en los sensores durante las pruebas de agarre de un cilindro de madera, un cilindro de teflón y una pelota de tenis, respectivamente. Comparando las Figs.10, 11 y 12 con la Fig. 6 se observa que los resultados de las experiencias de agarre humano y de agarre con el dedo antropomórfico, no presentan gran similitud en sí. Una razón de esta diferencia es el efecto de la posición del dedo pulgar que en el prototipo no tiene movimiento. Sin embargo, las magnitudes de las fuerzas aplicadas por el prototipo permiten el buen agarre de los diferentes objetos utilizados en las pruebas de agarre humano.

Tabla 2. Dimensiones del proyecto cinemático del nuevo prototipo de dedo.

Tamaño de eslabón [mm]								Tamaño de ángulo [grados]		
$A_0A_1$	$A_1B_1$	$B_1B_0$	$A_1A_2$	$C_1D_1$	$C_1A_2$	$A_1D_1$	$D_1E_1$	$\gamma_G$	$\gamma_g$	$\gamma_e$
40.5	5.4	40.9	4.8	5.4	26.0	25.0	23.6	51.0	129.0	127.0

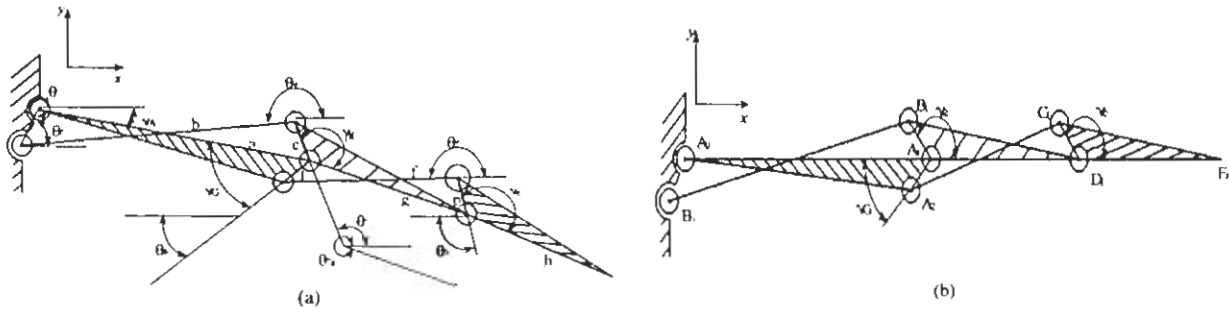


Fig. 7. Esquema cinemático de un dedo: (a) ángulos característicos; (b) posiciones de las conexiones.

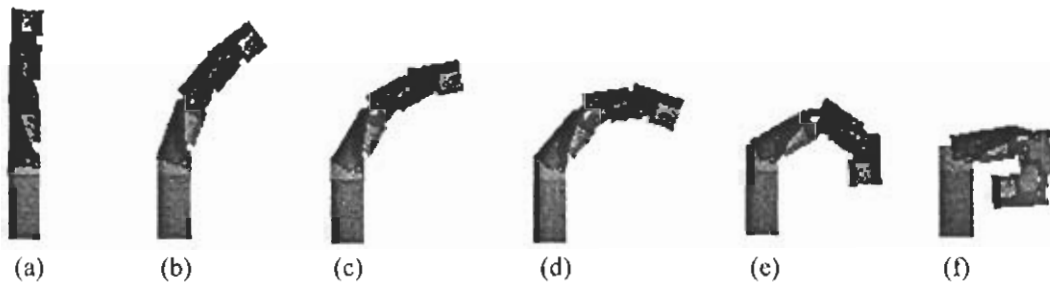


Fig. 8. Simulación del movimiento humano de cierre para el diseño del nuevo prototipo de dedo de Cassino: (a)  $\theta_1= 0$  deg.; (b)  $\theta_1= 20$  deg.; (c)  $\theta_1=40$  deg.; (d)  $\theta_1=60$  deg.; (e)  $\theta_1=80$  deg.

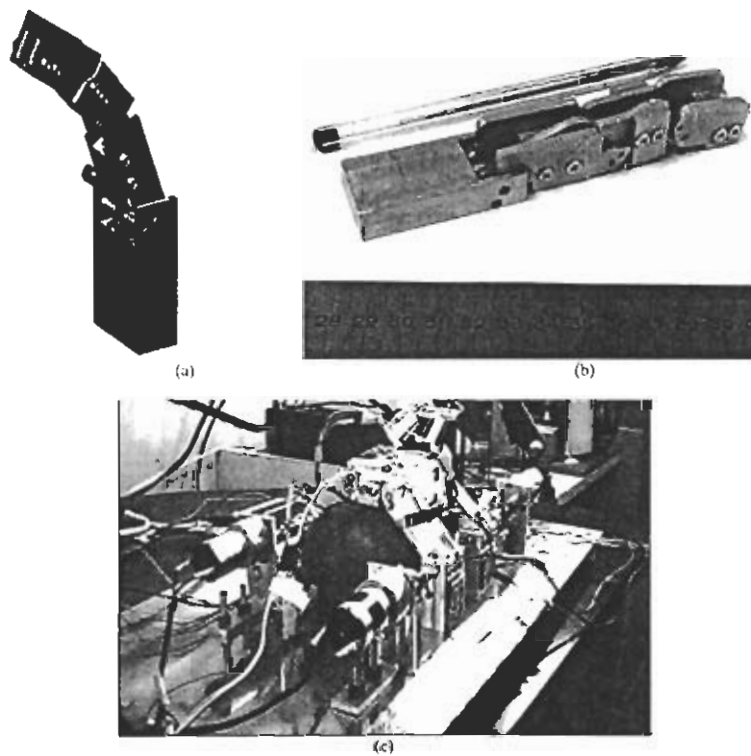


Fig. 9. El nuevo dedo antropomórfico: (a) un esquema CAD; (b) un prototipo que ha sido construido en el LARM; (c) aplicación en una mano robótica de tres dedos.

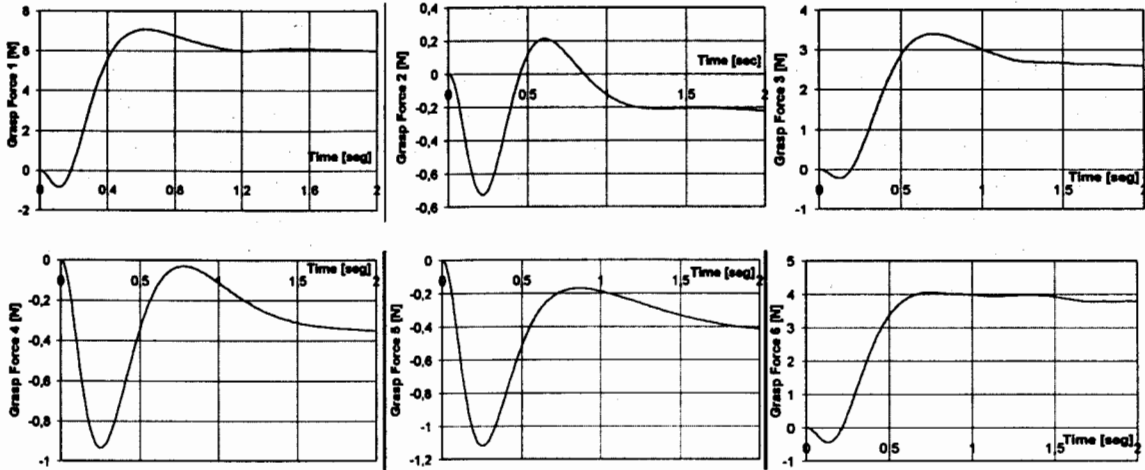


Fig. 10. Fuerzas registradas en los sensores durante la prueba de agarre de un cilindro de madera con el prototipo de Fig. 9: (a) sensor 1; (b) sensor 2; (c) sensor 3; (d) sensor 4; (e) sensor 5; (f) sensor 6.

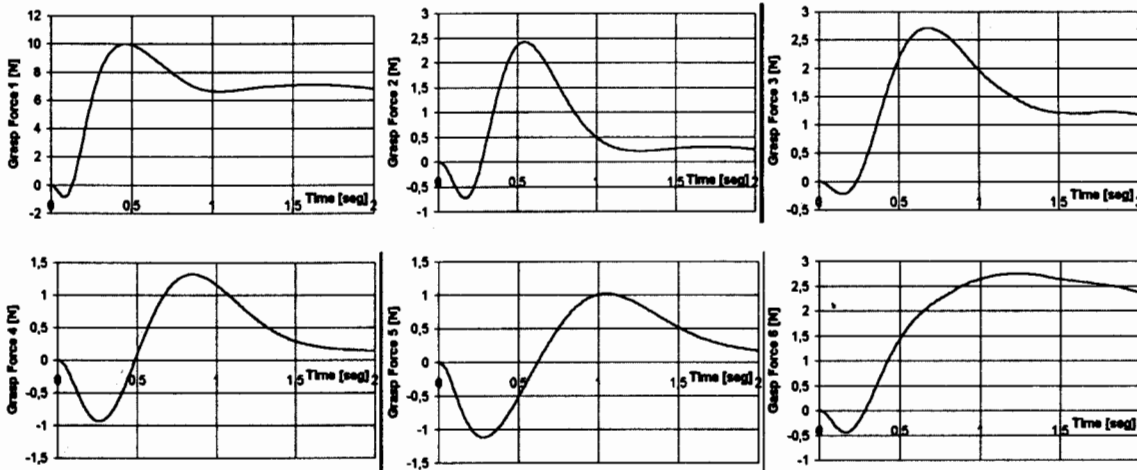


Fig. 11. Fuerzas registradas en los sensores durante la prueba de agarre de un cilindro de teflón con el prototipo de Fig. 9: (a) sensor 1; (b) sensor 2; (c) sensor 3; (d) sensor 4; (e) sensor 5; (f) sensor 6.

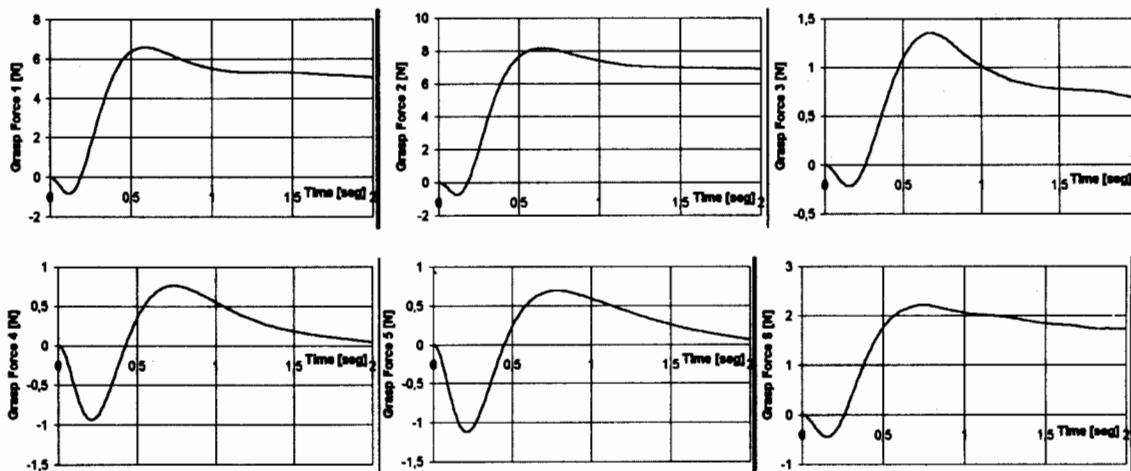


Fig. 12. Fuerzas registradas en los sensores durante la prueba de agarre de una pelota de tenis con el prototipo de Fig. 9: (a) sensor 1; (b) sensor 2; (c) sensor 3; (d) sensor 4; (e) sensor 5; (f) sensor 6.

## 6. CONCLUSIONES

En el LARM de Cassino se ha proyectado un mecanismo compacto y contenido dentro de la estructura de las falanges que lo conforman, cuyas dimensiones coinciden con el promedio de las medidas realizadas a un grupo de personas adultas. El diseño del mecanismo con un grado de libertad ha sido obtenido a partir de pruebas experimentales del agarre cilíndrico de la mano humana, a manera de encontrar dimensiones convenientes de las falanges para conseguir un cierre antropomórfico del agarre. Los resultados experimentales muestran la viabilidad práctica del prototipo como un módulo para una mano robótica de tres dedos que se construirá en el LARM (Laboratorio de Robótica y Mecatrónica).

## REFERENCIAS

- [1] Rosheim M. E., *Robot Evolution: The Development of Anthropotics*, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1994, pp.190-225.
- [2] Taylor G.L., Schwartz R.J., *The Anatomy and Mechanics of the Human Hand*, Artificial Limbs, 1955, Vol.2, pp.22-35.
- [3] Iberal T., «Human Prehension and Dexterous Robot Hands», *The Int. Journal of Robotics Research*, 1997, Vol.16, No.3, pp.285-299.
- [4] Salisbury J.K., «Design and Control of an Articulated Hand», *Int. Symposium on Design and Synthesis*, Tokyo, 1984, Vol.14, pp.25-29.
- [5] Jacobsen S. C., Wood J. E., Knutti D. F., Biggers K. B., «The Utah/MIT Dexterous Hand: Work in Progress», *The Int. Journal of Robotics Research*, 1984, Vol.3, No.4, pp.21-49.
- [6] Fukaya N., Toyama S., Asfour T., Dillmann R., «Design of the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand», *IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, 2000, Vol.3, pp.1754-1759.
- [7] Butterfass J., Hirzinger G., Knoch S., Liu H., «DLR's Multisensory Articulated Hand Part I: Hard and Software Architecture», *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation ICRA'98*, Leuven, 1998, Vol.3, pp.2081-2086.
- [8] Gosselin C.M., Mountambault S., Gosselin C.J., «Manus Colobi: Preliminary Results on the Design of a Mechanical Hand for Industrial Applications», *19th ASME Design Automation Conference*, Albuquerque, 1993, DE-Vol.65-1, pp.585-592.
- [9] Zhang Y., Han Z., Zhan H., Shang X., Wang T., Guo W., «Design and control of the BUAA four-fingered hand», *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, pp.2517-2522.
- [10] Figliolini G., Ceccarelli M., «A Mechanical Design of One D.O.F. Anthropomorphic Finger Based on a Human Finger Motion», *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Baltimore, 2000, paper DETC2000/MECH-14132.
- [11] Civitillo R., «Diseño y validación experimental de un dedo antropomorfo con un grado de libertad», Proyecto final de carrera, LARM Universidad de Cassino, Cassino, 2001. (en italiano)
- [12] Carbone G., Civitillo R., Ceccarelli M., «Design and Test of an Articulated Mechanism for a 1-Dof Anthropomorphic Finger», *ASME Design Engineering Technical Conferences DETC'02*, Montreal, 2002, paper MECH-34300.
- [13] Jauregui Becker J.M., Parada Puig J.E., Nava Rodríguez N.E., «Diseño de una mano antropomorfa con tres dedos a un grado de libertad», Proyecto final de carrera, Universidad de los Andes, Merida, 2002. (desarrollado en LARM de la Universidad de Cassino)
- [14] Ceccarelli M., Jauregui Becker J.M., Parada Puig J.E., Nava Rodríguez N.E., Lanni C., Carbone G., «Experimental Activity for Designing a Hand with 1 Dof Anthropomorphic Fingers of Human Size», *12th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD 2003*, Cassino, 2003, paper 009RAAD03.
- [15] Kondeck Comatel, Specification Sheet for Standard Lusense Sensors of PS<sup>3</sup> Family, Technical Data Sheet, 2001.
- [16] National Instruments, LabVIEW: Basic Course Manual, 1995.



[17] National Instruments, DAQ Acquisition board AT -MIO-16E-2, General Catalogue, 1995.

[18] Autodesk, «Inventor 5.3 User Manual», html version, 2002.

## **DESIGN AND EXPERIMENTAL TESTS OF A 1 D.O.F. ARTICULATED ANTROPOMORPHIC FINGER FOR ROBOTIC HANDS**

**Abstract:** This paper illustrates the design of a new low-cost and easy operation 1 d.o.f. finger prototype, which can be used as a module for an anthropomorphic hand. Particular attention has been addressed to the design of an articulated finger mechanism, which transmits the power from the input shaft to the phalanges of a finger. The design of this 1 d.o.f. articulated mechanism has been achieved by analyzing the human cylindrical grasp in order to find out suitable dimensions and values for transmission ratios between phalanges for a human like grasping motion of fingers. Experimental tests have been carried out on human hands and built prototype of anthropomorphic finger. The experimental results show the practical feasibility of the prototype as module for a three finger robotic hand.