

Rango de movilidad y función descriptiva del dedo índice

Velázquez-Sánchez A.¹

Merchán-Cruz E.³

Hernández-Gómez. L.¹

Urriolagoitia-Calderón G.¹

¹ Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México, DF.

² Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México, DF. MÉXICO.

correo electrónico: alexrobsis@hotmail.com, eamerchan@ipn.mx

Recibido el 2 de octubre de 2006; aceptado el 25 de mayo de 2007.

1. Resumen

El presente trabajo muestra el análisis cinemático del dedo índice de la mano, el cual examina el movimiento de las falanges distal media y proximal (FD, FM, FP) durante la manipulación de algunos objetos. El estudio se enfoca principalmente en dos tipos de agarre: el agarre cilíndrico y el agarre puntual, esto con la finalidad de determinar la posición, velocidad y aceleración angular de cada una de las falanges, así como la relación cinemática entre ellas, para establecer una función que describa el movimiento del dedo. Se ha desarrollado un aditamento para monitorear las variables cinemáticas de cada una de las articulaciones del dedo, durante la sujeción de objetos, la flexión y extensión del dedo índice, la posición y velocidad angular, necesarias para establecer una función o curva que describa el movimiento del dedo.

La caracterización del movimiento del dedo índice se realiza por medio de sensores de posición, los cuales se colocan directamente sobre las articulaciones interfalángicas y la cadena cinemática que cubre el dedo (Exoesqueleto). La posición angular de las falanges es digitalizada por medio de un microcontrolador, que a su vez trasmite los datos obtenidos a una computadora, donde se realiza los cálculos de velocidad, aceleración y trayectoria descrita por el movimiento del dedo.

Palabras clave: dedo índice, cinemática, agarre puntual, agarre cilíndrico, rango de movilidad, función descriptiva, trayectoria.

2. Abstract (Mobility Range and Descriptive Function of Index Finger)

In this work, The Kinematics Analysis of Human Hand Index Finger is presented, The Distal, Medial and Proximal Phalanges (PD, PM, PP) movement is examined, during objects manipulation. This analysis is focused in two types of grasp: Cylindrical Grasp and Tip Grasp, this aim to obtain angular position, velocity and acceleration. In order to obtain the relative velocity between each one of the phalanges and a function that describes the index finger behavior during Cylindrical and Tip Grasp.

The movement of the Index Finger characterization is carried out by position sensors that are placed directly on interphalangeal joints and kinematics chain that covers the finger. By means of a microcontroller, the angular position is send to PC where the velocity, acceleration and trajectory described by the finger are estimates.

Key words: kinematics, index finger, phalange, tip grasp and cylindrical grasp, index of angular mobility.

3. Introducción

La mano cuenta con 27 huesos incluyendo los de la muñeca, 14 falanges en los dedos, 5 metacarpianos y 8 carpianos, estos huesos constituyen los 4 grupos principales de articulaciones de la mano, denominadas: Articulación Distal Interfalángica (DIF), Proximal Interfalángica (PIF), Metacarpofalángica (MCF) y Carpometacarpiana (CMC) [1, 2], como se muestra en la figura 1. Cada uno de los dedos cuenta con tres falanges, falange distal, media y proximal, mientras que el dedo pulgar solo cuenta con falange distal y proximal[3, 4], la longitud de las falanges incrementa conforme se acercan a los metacarpianos, es decir, la falange distal es de menor longitud mientras que la falange proximal es la más larga de las tres[5].

Por otra parte, el movimiento de los dedos se mide en términos del grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión, es importante observar que la hiperextensión esta medida con un ángulo negativo, por lo tanto el rango total del movimiento de cada uno de los dedos se determina restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión [6].

El movimiento de las articulaciones interfalángicas (PIF, DIF) y metacarpofalángicas (MCF) del dedo pulgar está determinado

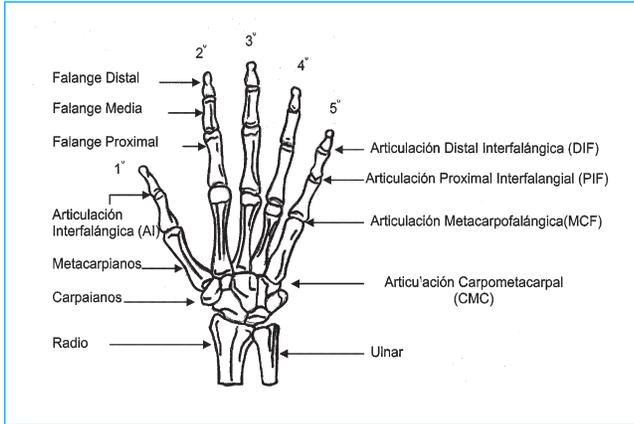


Fig. 1. Articulaciones y huesos de la mano [1, 4].

de la misma forma que los demás dedos, empleando el criterio anterior para cada una de las articulaciones. El movimiento de la articulación CMC del pulgar esta definida por la abducción radial y palmar, así como de la oposición y retroposición del pulgar, destacando los siguientes movimientos.

- Flexión y extensión de los dedos a la altura de las articulaciones MCF.
- Flexión y extensión de los dedos a la altura de las articulaciones IF.
- Abducción y aducción de los dedos a la altura de las articulaciones MCF.
- Flexión y extensión del pulgar a la altura de la articulación MCF y de la articulación IF (abducción transpalmar y abducción radial).
- Abducción y aducción del pulgar a nivel de la articulación carpometacarpal (abducción palmar).
- Oposición.

Durante la flexión normal de los dedos, éstos se encuentran juntos en movimiento continuo y tocan la palma aproximada-

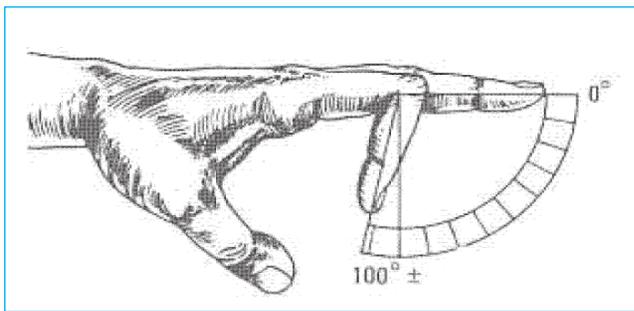


Fig. 2. Arcos de movilidad de la articulación interfalángica proximal: flexión y extensión [6].

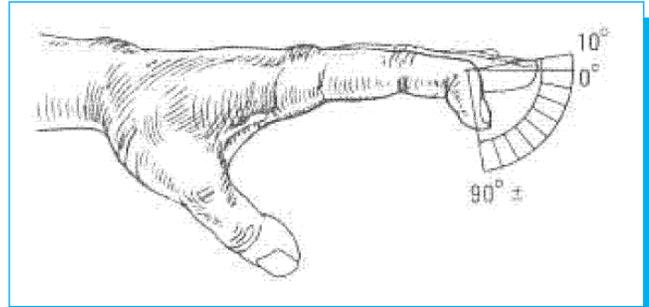


Fig. 3. Arcos de movilidad de la articulación interfalángica distal: Flexión y Extensión [6].

mente al nivel del surco palmar distal, como se muestran en las figuras 2 y 3. En la extensión normal los dedos se mueven de forma conjunta y se extienden hasta la posición recta.

La abducción y la aducción se miden a partir de la línea axial de la mano, todos los dedos se separan en arcos de aproximadamente 20°, mientras que en aducción se juntan y tocan entre si, como se muestra en la figura 4.

Aunque de forma conjunta, los dedos presentan un rango de movilidad promedio, de forma individual el rango varía de un dedo a otro, por ejemplo, la articulación MCF del dedo índice presenta un rango de movilidad de 70° y la articulación MCF del dedo meñique un rango de 95° [7]. El rango de movilidad de la abducción y aducción del dedo índice, es aproximadamente de 60°, 45° para el dedo medio y 50° para el dedo meñique.

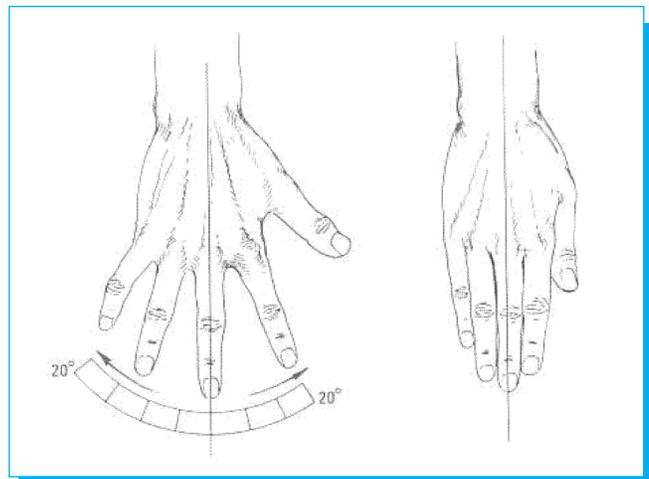


Fig. 4. Abducción y Aducción de los dedos [6].

Tabla 1. Relación porcentual de la longitud de las falanges con respecto a la longitud de la mano.

Falange	Proximal	Medial	Distal
Pulgar	17.1	-	12.1
Índice	21.8	14.1	8.6
Medio	24.5	15.8	9.8
Anular	22.2	15.3	9.7
Meñique	17.2	10.8	8.6

El rango de movilidad de las articulaciones MCF en la flexión y extensión decrecen cuando la abducción y aducción se incrementan y viceversa desde una posición central del dedo, esto debido a la estructura bicondiliar de los metacarpianos.

Al igual que los rangos de movilidad, las propiedades antropométricas de los dedos son necesarias para el análisis estático y dinámico de los mismos. En general, propiedades como la longitud de las falanges, el peso y el centro de gravedad, el punto de inserción del músculo, el centro de la articulación y los puntos de contacto entre las falanges, son algunas de las variables que intervienen directamente en el análisis estático de los dedos [8, 9].

Se han realizado trabajos relacionados con el estudio antropométrico de la mano y las falanges, como el presentado por Davidoff [10, 11], el estudio de las articulaciones interfalángicas [12-16], así como los rangos de flexión y extensión de las falanges [9, 17, 18].

La tabla 1 presenta el estudio antropométrico realizado por Garrett [11] donde se muestra la relación en longitud que existe entre los dedos con respecto al porcentaje de la longitud total de la mano.

La sujeción de un objeto puede definirse como "la aplicación de fuerzas funcionales de la mano hacia un objeto para realizar una tarea determinada" [7]. Existe una gran variedad de formas de sujetar un objeto, que se obtienen cambiando la cinemática y la cinética de la mano, para ello es necesario manejar 30 variables mecánicas: seis por cada dedo, tres componentes de fuerza y tres componentes de momento para sostener un objeto de forma estable. Es posible manejar la fuerza aplicada en cada uno de los dedos, así como cambiar la cinemática del agarre, usando diferentes posiciones en las falanges de los dedos, para sujetar un objeto determinado.

Muchos investigadores han realizado la clasificación de los tipos de agarre, entre los que destacan Iberall, Cutkosky [19-22], por mencionar algunos. Skinner ha clasificado los agarres

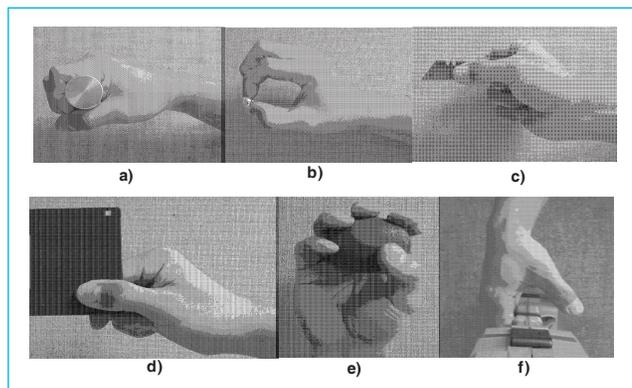


Fig. 5. Clasificación y tipos de agarre: a) Cilíndrico, b) Puntual, c) Palmar, d) Lateral, e) Esférico, f) Gancho [23].

en: cilíndrico, puntual, palmar, lateral, esférico y de gancho [23], como se muestra en la figura 5.

1. Un agarre cilíndrico se usa para sujetar objetos como la taza de café y objetos de forma cilíndrica en general.
2. El agarre puntual se usa cuando se sujetan objetos pequeños como tornillos, clavos o pedazos de papel.
3. Un agarre palmar se usa para sostener objetos relativamente delgados.
4. El agarre lateral se usa para objetos delgados y plano.
5. El agarre esférico se emplea para sujetar objetos como una pelota o una manzana.
6. El agarre de gancho se usa para levantar, jalar o sujetar objetos pesados.

4. Desarrollo

La caracterización del movimiento del dedo índice se realiza por medio de sensores de posición, que se colocan directamente sobre las articulaciones interfalángicas y la cadena cinemática abierta que cubre la estructura del dedo (Exoesqueleto).

El dedo índice esta equipado con el exoesqueleto y los sensores de posición, la posición angular de las falanges es digitalizada por medio de un microcontrolador, que a su vez trasmite los datos obtenidos a una computadora, donde se realiza los cálculos de posición, velocidad y trayectoria descrita por el dedo.

La figura 6 muestra un diagrama esquemático de las etapas que intervienen en la caracterización del movimiento del dedo.

La posición angular representada por los eslabones que se encuentran montados en el dedo, es digitalizada por medio de un microcontrolador (PIC), el cual convierte esta posición

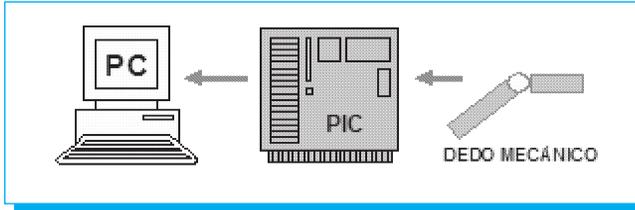


Fig. 6. Caracterización del movimiento del dedo artificial.

en señales digitales y la trasmite a la PC, para procesar la información y graficar el movimiento del dedo.

El mecanismo es instrumentado y conectado al microcontrolador para realizar la transmisión de datos hacia la computadora. Durante el análisis cinemático del dedo índice, se realizan una serie de agarres de tipo cilíndrico y puntal en los que se determinan los parámetros de posición en cada secuencia de agarre y la velocidad relativa de las falanges.

Calibración y determinación del rango de movilidad

Como paso inicial se realiza una secuencia de extensión flexión del dedo, para determinar el rango máximo de movilidad de cada falange repitiendo esta secuencia con diferentes intervalos de velocidad. La figura 7 muestra la secuencia de calibración, en ella se indican los ángulos θ_1 , θ_2 , y θ_3 correspondientes a las falanges proximal, media y distal respectivamente.

Agarre cilíndrico

En esta secuencia se debe considerar el tamaño del objeto a manipular, para ello se realiza el agarre cilíndrico con objetos

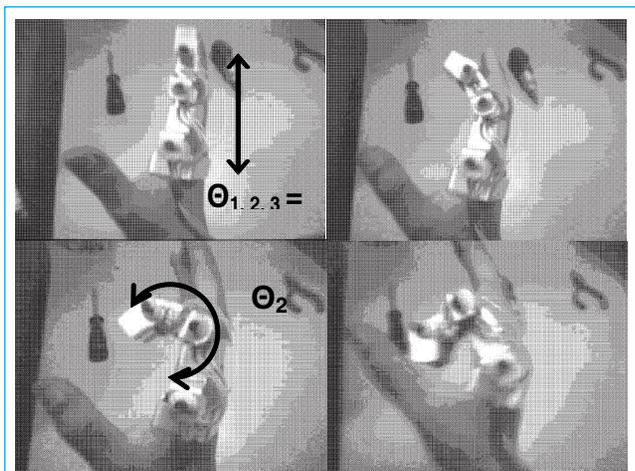


Fig. 7. Secuencia de flexión y extensión del dedo.

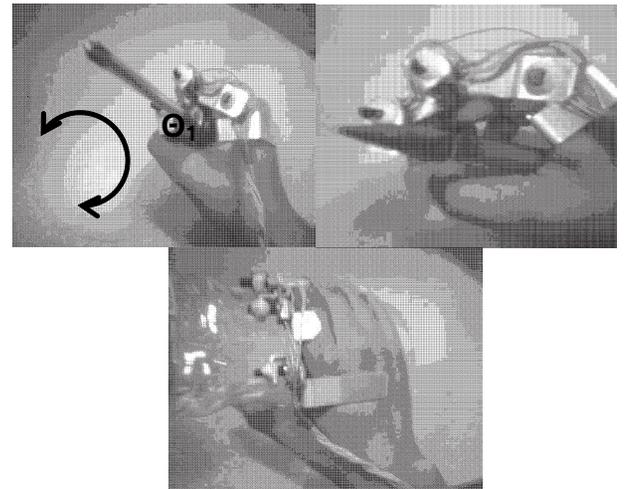


Fig. 8. Secuencia de agarre cilíndrico: (a) desarmador, (b) pinzas y (c) botella.

de diámetros diferentes, considerando el rango máximo de flexión y extensión del dedo. La figura 8 muestra los objetos que se emplean para la caracterización del agarre cilíndrico.

Agarre puntal

En este tipo de agarre, una de las características principales es que se presenta cuando se sujetan objetos de diámetros relativamente pequeños, tales como lápices, tornillos o cualquier otro objeto no necesariamente circular, pero si de proporciones pequeñas. En la figura 9 se muestra la forma como



Fig. 9. Agarre puntal: (a) desarmador, (b) Lápiz y (c) tornillo.

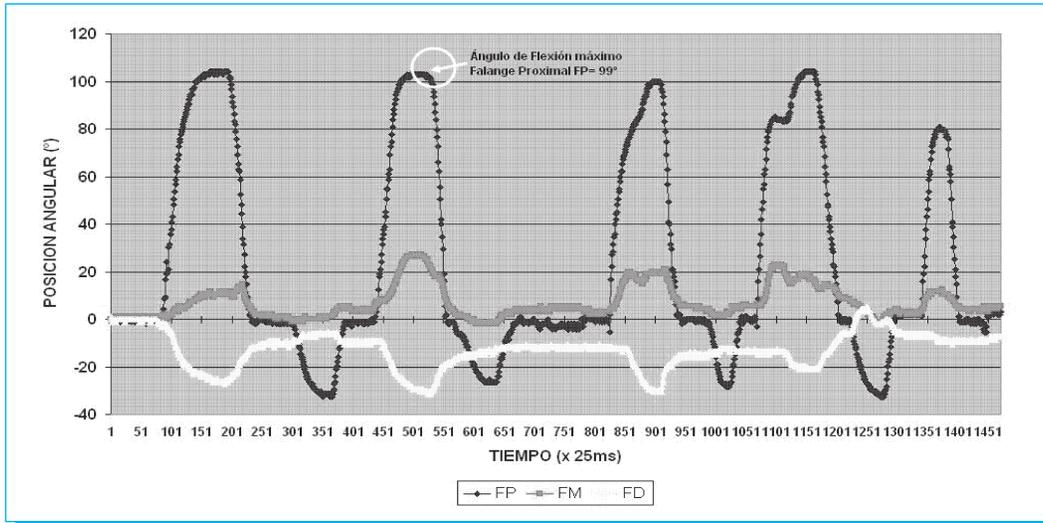


Fig. 10. Rango de movilidad de la falange proximal.

estos objetos serán sujetos con la finalidad de determinar los parámetros cinemáticos correspondientes a este agarre.

Tanto el agarre cilíndrico como el agarre puntual ejemplifican claramente los movimientos que de forma cotidiana ejecuta la mano para manipular diversos objetos.

5. Análisis de resultados

La figura 10 muestra la gráfica obtenida en la flexión y extensión de la falange proximal con una flexión activa. En

ella se observa el ángulo de flexión máximo de la falange que es de 98°.

De forma similar, se realiza una serie movimientos de flexión y extensión de las falanges media y distal, dejando estática la falange proximal, obteniendo como resultado los ángulos máximos de 115° y 78°. La figura 11 muestra las posiciones angulares que se obtuvieron en la flexión pasiva de las falanges media y distal, así como la trayectoria descrita. En la figura 11b se observan los eslabones que representan la posición de las falanges del dedo índice en esta secuencia de agarre.

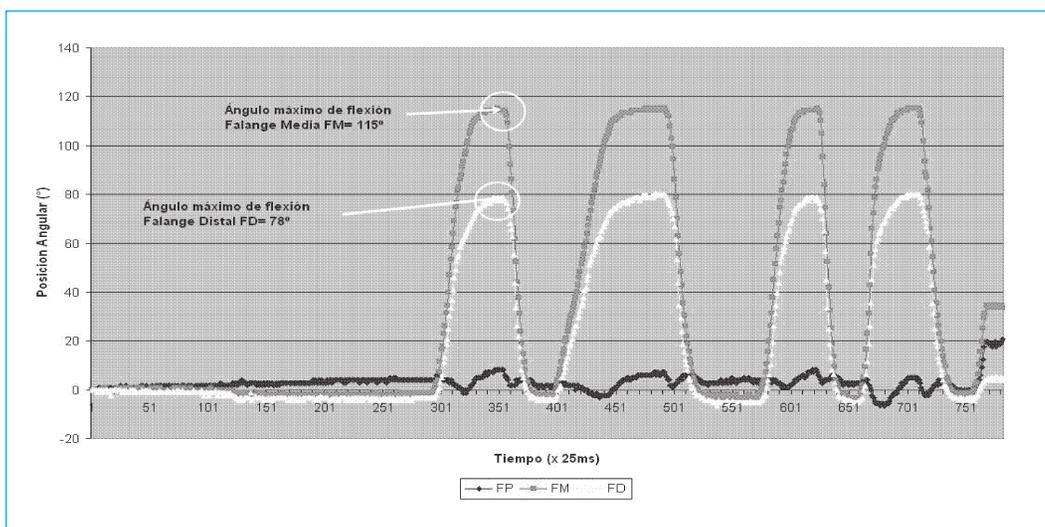


Fig. 11a. Flexión y extensión de la falange media y distal. Posición angular.

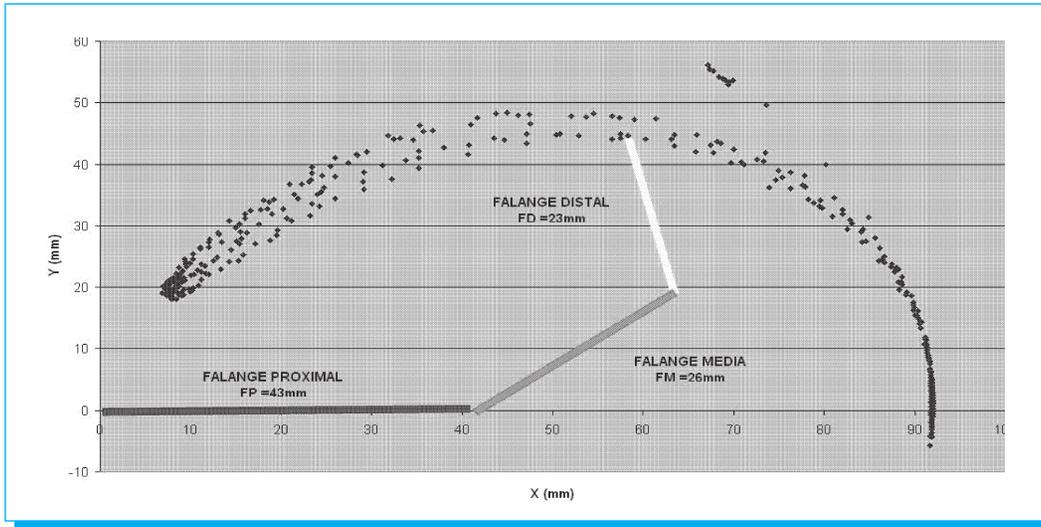


Fig. 11b. Flexión y extensión de la falange media y distal. Trayectoria descrita.

Para determinar el área de trabajo del dedo índice, se realiza una serie de movimientos donde se involucran los rangos de flexión máximos y mínimos de cada falange, esto es con la finalidad de determinar la vecindad de puntos donde puede trabajar el dedo.

El área de trabajo descrita por el dedo se muestra en la figura 12 y en ella se observa la dispersión de puntos que limitan la vecindad o campo de acción, destacando los cruces por los ejes coordenados correspondientes a $X=0, Y=90$ y $X=90, Y=0$, así como la cresta en la parte inferior de la gráfica, provocada por los límites de flexión de cada falange.

De acuerdo con los resultados que se presentan en [17, 18, 24], los parámetros cinemáticos obtenidos en este análisis presentan una pequeña variación, provocada por la longitud de las falanges analizadas, así como la habilidad y destreza del individuo al realizar las pruebas.

Ya que las dimensiones de ambos dedos (el analizado y al que se refiere en [24]), son muy similares, el área de trabajo o campo de acción, también lo son como se puede ver en la tabla 2. Comparando los resultados del área de trabajo del dedo índice con respecto a [18], es posible observar que los

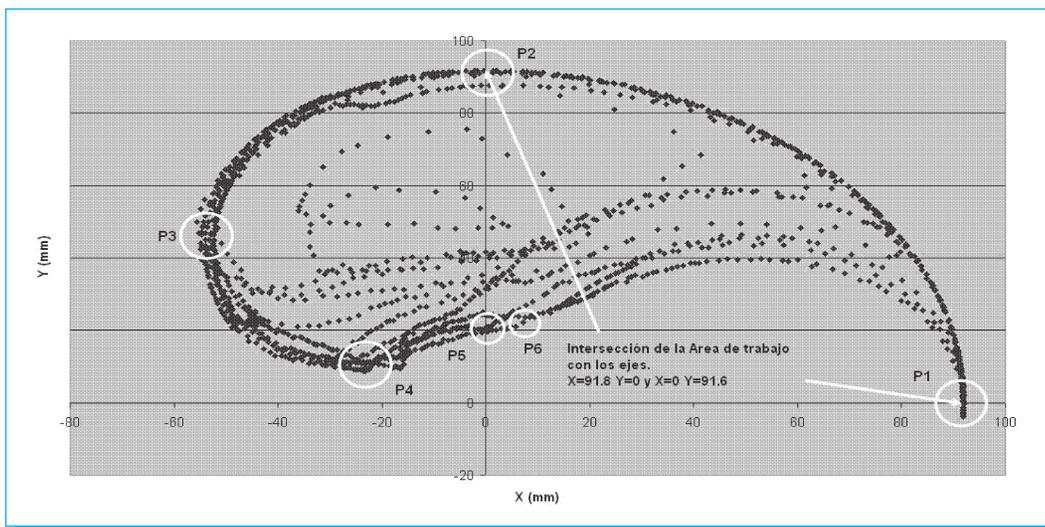


Fig. 12. Determinación del área de trabajo del dedo índice.

Tabla 2. Comparación del rango de movilidad.

FALANGE	VELÁZQUEZ [9]		FIGLIOLINI [24]	
	LONG.	ANG.	LONG.	ANG.
Proximal	43mm	98°	43mm	83°
Media	26mm	115°	25mm	105°
Distal	23mm	78°	23mm	78°

puntos interesantes en este análisis, son aquellos por donde se cruzan los ejes de coordenadas, los cuales se muestran en la tabla comparativa 3.

Al analizar el comportamiento de la falange proximal del dedo índice y someterlo a una serie de flexiones y extensiones, se observa la periodicidad de este movimiento cuando se ejecuta el agarre cilíndrico. En la gráfica de la figura 13 se muestra la posición angular de la falange proximal, así como la línea de tendencia de ésta. De igual forma, se realiza el análisis únicamente de la flexión de la falange proximal, obteniendo una función que representa su comportamiento.

Por otra parte, se observa que el comportamiento de la falange proximal, media y distal de los dedos, se puede representar por medio de funciones periódicas como el seno y coseno, por lo que el movimiento de cada una de las falanges se representa por medio de una función "coseno" desfasada del origen, tanto en frecuencia como en amplitud, como se describe en la ecuación (1).

Tabla 3. Comparación de puntos representativos en el área de trabajo del dedo índice.

Punto	VELÁZQUEZ [9]		LOTTI [18]	
	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
P1	90	0	90	0
P2	0	90	0	90
P3	-55	43	-40	50
P4	-22	8	-24	22
P5	0	20	0	42
P6	10	25	25	30

$$\theta_q = \theta_{RMF} / 2 (\cos(\omega t + \pi)) + \theta_{RMF} / 2 \quad (1)$$

Donde θ_q es la posición angular generalizada de cada falange y θ_{RMF} es el ángulo máximo desarrollado por cada una de las falanges en el agarre cilíndrico y puntual, de esta forma, considerando los datos obtenidos en la tabla 2, la ecuación que describe el movimiento de cada falange está dada por:

$$\theta_{FP} = \pi / 6 (\cos(\omega t + \pi)) + \pi / 6 \quad (2)$$

$$\theta_{FM} = \pi / 4 (\cos(\omega t + \pi)) + \pi / 4 \quad (3)$$

$$\theta_{FD} = 7\pi / 72 (\cos(\omega t + \pi)) + 7\pi / 72 \quad (4)$$

Donde ω esta definida por la velocidad angular promedio con que se mueve cada una de las falanges, $\omega = 2.45 \text{ rad/s}$.

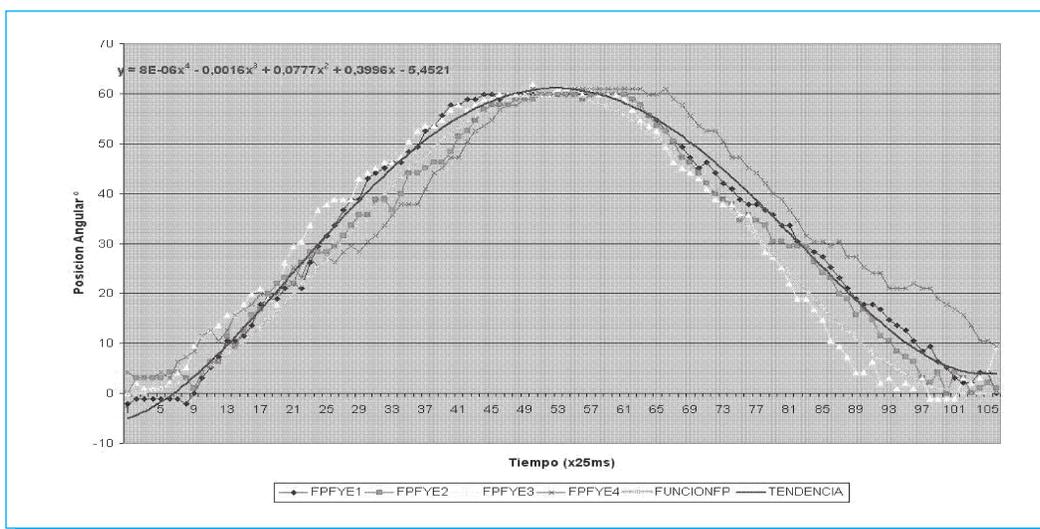


Fig. 13. Función descrita por la falange proximal.

Como se observa, el comportamiento de las falanges es idéntico, por lo que es posible establecer una relación entre ellas. Despejando los términos idénticos de las ecuaciones 2, 3 y 4, se tiene:

$$\cos(\omega t + \pi) = \frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \quad (5)$$

$$\cos(\omega t + \pi) = \frac{\theta_{FM} - \pi/4}{\pi/4} \quad (6)$$

$$\cos(\omega t + \pi) = \frac{\theta_{FM} - 7\pi/72}{7\pi/72} \quad (7)$$

Igualando las ecuaciones 6 y 7 se tiene:

$$\frac{\theta_{FM} - \pi/4}{\pi/4} = \frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \quad (8)$$

Despejando θ_{FM} se tiene:

$$\theta_{FM} = \left[\frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \right] \pi/4 + \pi/4 = \left[\frac{\theta_{FP}}{\pi/6} - 1 \right] \pi/4 + \pi/4$$

$$\theta_{FM} = \frac{\pi/4 \theta_{FP}}{\pi/6} - \pi/4 + \pi/4 = \frac{\pi/4 \theta_{FP}}{\pi/6} = \frac{6\pi}{4\pi} \theta_{FP}$$

$$\theta_{FM} = \frac{3}{2} \theta_{FP} \quad (9)$$

De la misma forma, igualando las ecuaciones 5 y 7 se obtiene:

$$\frac{\theta_{FD} - 7\pi/72}{7\pi/72} = \frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \quad (10)$$

$$\theta_{FD} = \left[\frac{\theta_{FP} - \pi/6}{\pi/6} \right] 7\pi/72 + 7\pi/72 = \left[\frac{\theta_{FP}}{\pi/6} - 1 \right] 7\pi/72 + 7\pi/72$$

$$\theta_{FM} = \frac{7\pi/72 \theta_{FP}}{\pi/6} = \frac{42\pi}{72\pi} \theta_{FP} = \frac{7}{12} \theta_{FP} \quad (11)$$

A su vez, es posible establecer una relación entre la posición de la falange media y distal, como lo demuestra la ecuación 12.

$$\frac{\theta_{FD} - 7\pi/72}{7\pi/72} = \frac{\theta_{FM} - \pi/4}{\pi/4} \quad (12)$$

$$\theta_{FD} = \left[\frac{\theta_{FM} - \pi/4}{\pi/4} \right] 7\pi/72 + 7\pi/72 = \left[\frac{\theta_{FM}}{\pi/4} - 1 \right] 7\pi/72 + 7\pi/72$$

$$\theta_{FD} = \frac{7\pi/72 \theta_{FM}}{\pi/4} = \frac{28\pi}{72\pi} \theta_{FM} = \frac{7}{18} \theta_{FM} \quad (13)$$

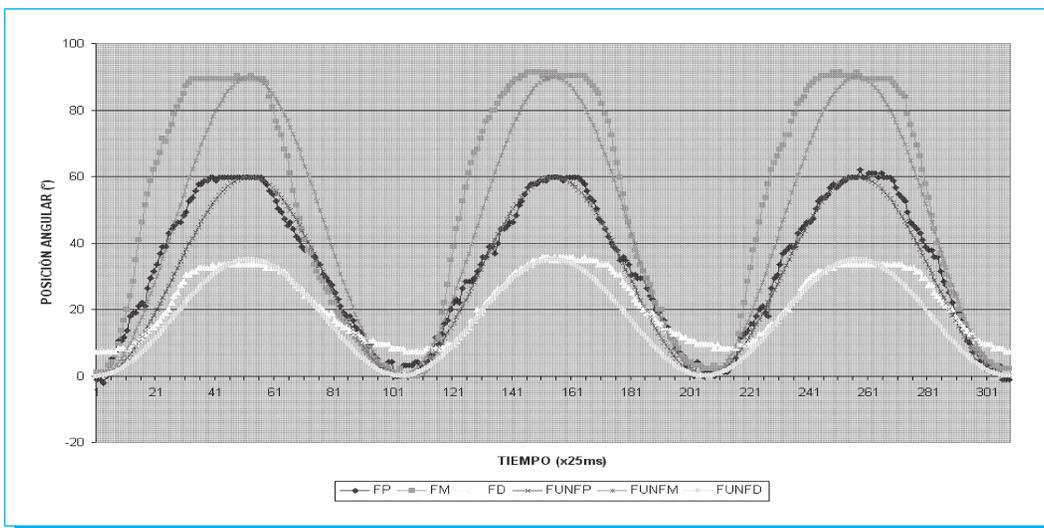


Fig. 14. Función coseno de la FP, FM y FD.

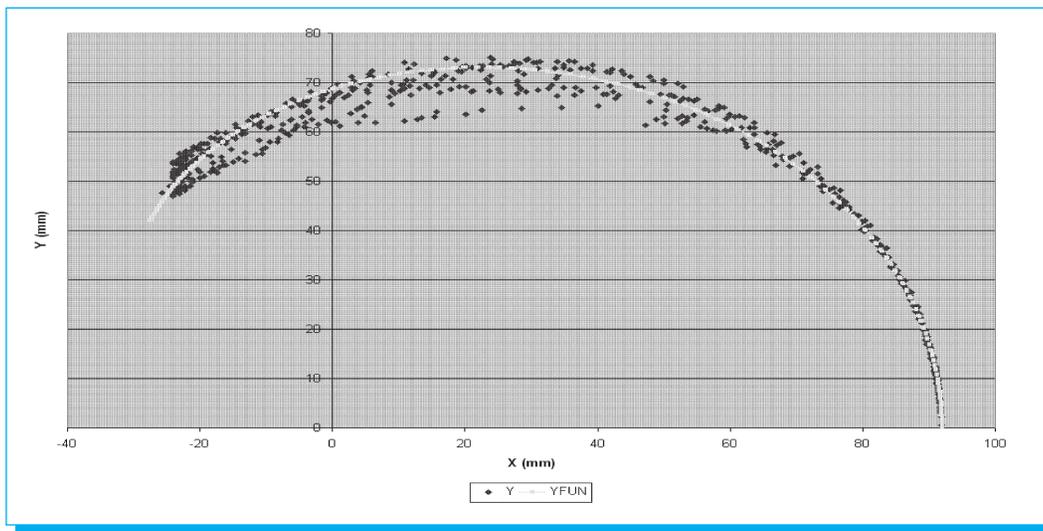


Fig. 15. Trayectoria descrita por las funciones descriptivas del dedo Índice en el agarre cilíndrico.

En la gráfica de la figura 14 se muestra la posición de las falanges proximal, media y distal que se obtuvieron de forma experimental, así como las que se obtienen por medio de las funciones descritas en las ecuaciones 3, 4 y 5.

Cabe señalar que aunque la función descriptiva del movimiento difiera un poco de la posición angular que se obtuvo de forma experimental, al graficar la trayectoria descrita por el modelo del dedo se observa que se encuentra

dentro de la vecindad de puntos que describen el tipo de agarre ejecutado por la mano, que en este caso es un agarre cilíndrico, como se muestra en la gráfica de la figura 15.

De la misma forma como se obtienen las funciones descriptivas del dedo índice para el agarre cilíndrico, se obtienen para el agarre puntual, donde se considera ahora un nuevo índice de movilidad. La gráfica de la figura 16 muestra las funciones descriptivas del dedo índice para los agarres

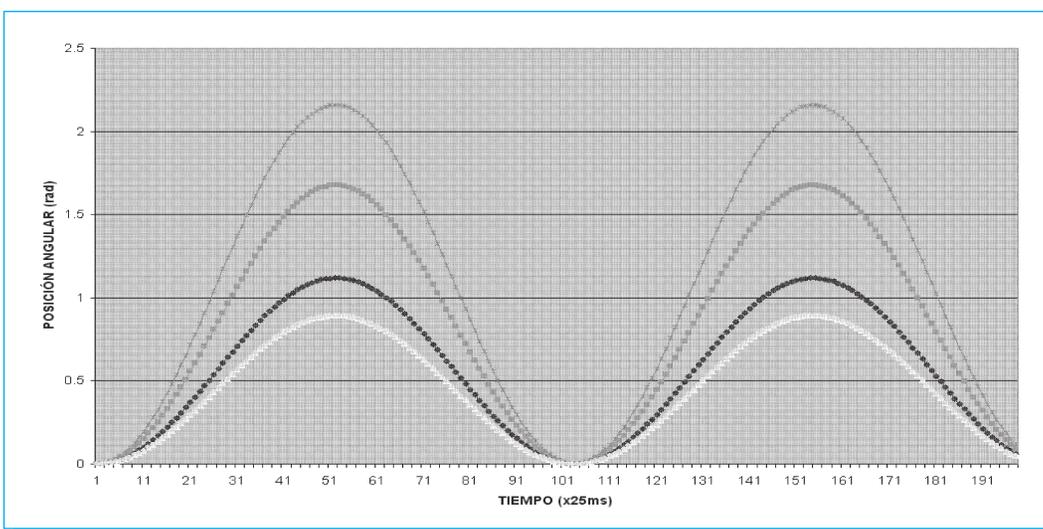


Fig. 16. Función descriptiva del dedo índice en los agarres cilíndrico y puntual.

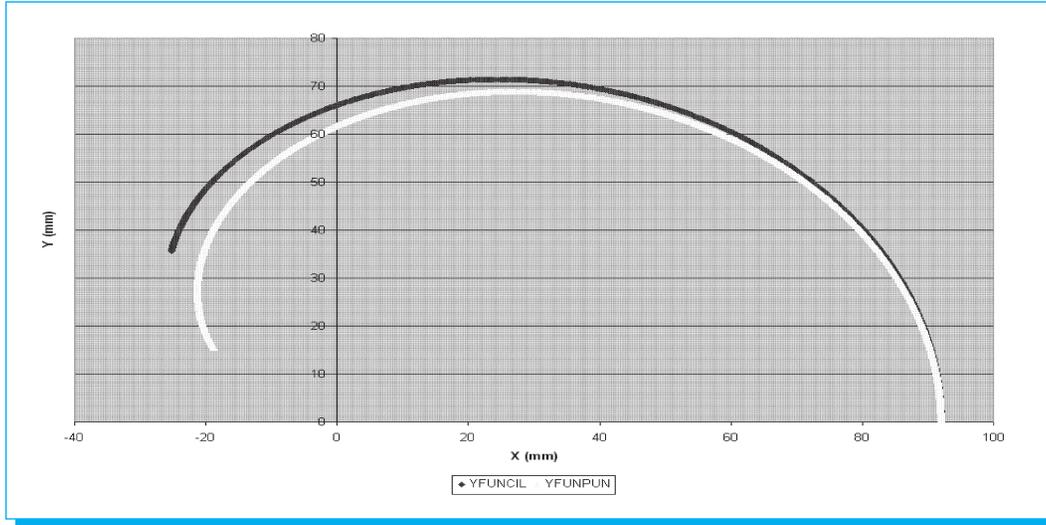


Fig. 17. Trayectoria descrita por el dedo mediante las funciones descriptivas.

cilíndrico y puntual, en la que se observa que tanto la falange proximal como distal poseen el mismo índice de movilidad, mientras que la falange media presenta un índice de movilidad diferente entre un agarre y otro haciendo la diferencia en el movimiento del dedo, figura 17.

Las trayectorias descritas por las funciones obtenidas para el agarre cilíndrico y puntual son comparadas con el área de trabajo de cada uno de los agarres, como se muestra en la gráfica de la figura 18.

5. Conclusiones

De acuerdo al estudio realizado, se obtuvo el rango de movilidad de cada falange del dedo índice, observando que aunque los ángulos de flexión y extensión máximos y mínimos no son exactamente los mismos, éstos se acercan mucho a los obtenidos por [24]. Estos valores dependen, como se menciona en este trabajo, de las características antropométricas del dedo, así como de la destreza o habilidad de los individuos para realizar estos movimientos.

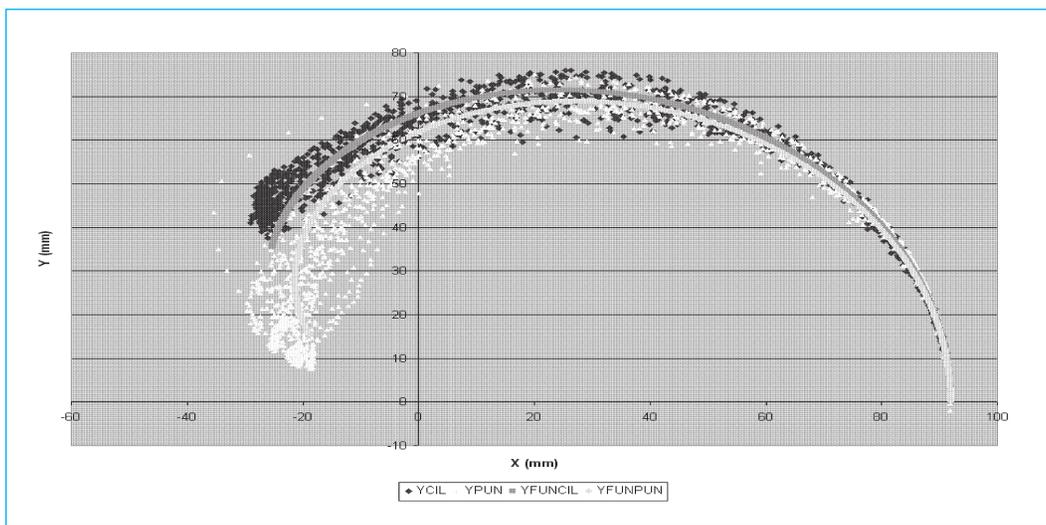


Fig. 18. Agarre cilíndrico y puntual: experimentalmente y mediante funciones descriptivas.

El área de trabajo obtenida experimentalmente, presenta en gran medida una similitud con la obtenida por [18], coincidiendo los puntos, que se consideran estratégicos en esta gráfica, como los cruces por los ejes coordenados y las crestas debajo del área de trabajo. Aunque la falange proximal presenta un mayor rango de movilidad (ángulo de flexión y extensión), en el agarre cilíndrico y puntual la falange media es la que presenta una mayor actividad, ya que interviene en el agarre en mayor medida.

Existe una relación entre la posición angular de cada falange o Índice de movilidad, la falange media tiene un índice de movilidad de 1.5, es decir, si la falange proximal se mueve 1° , la falange media deberá girar 1.5° , mientras que la falange distal solo se moverá 0.6° . Así mismo, en el agarre puntual, los índices de movilidad de las falanges son muy aproximados, con lo cual se puede considerar este índice como una relación de movimiento para reproducir los agarres cilíndricos y puntuales, con dedos mecánicos o robóticos.

El índice de movilidad de cada una de las falanges nos permite poder determinar una función capaz de reproducir el movimiento del dedo, con la finalidad de simplificar el diseño de estructuras mecánicas y robóticas que buscan emular el comportamiento del dedo índice y de la mano en general.

6. Referencias

- [1] K. Van De Graaff, *Human Anatomy*. Boston, NY: McGraw-Hill, 2000.
- [2] S. Ariyan, *Cirugía de la Mano*. México D. F.: Manual Moderno, 1985.
- [3] K. Lie-Chieh, "Quantitative Analysis of the Thumb Kinematics," in *Institute of Biomedical Engineering*, vol. PhD. Tainan, Taiwan.: National Cheng Kung University, 2005.
- [4] M. Nordin and V. H. Frankel, *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
- [5] T. E. Thrumble, *Principles of hand surgery and therapy*. Seattle, Washington: Saunders Company, 1990.
- [6] S. Hoppenfeld, *Exploración Física de la Columna Vertebral y las Extremidades*, 20a ed. México: El Manual Moderno, 1985.
- [7] G. Casalino, G. Cannata, A. Caffaz, and S. Bernieri, "The design and Development of the DIST-Hand Dexterous Gripper," presented at International Congress of Robotics and Automation. ICRA98, Leuven, Belgium., 1998.
- [8] A. T. Velázquez, E. A. Merchan, and J. Ramírez, "Análisis Cinemático del Dedo Índice de la Mano: Estudio Preliminar," presented at 4° Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México D. F., 2005.
- [9] A. T. Velázquez, E. A. Merchan, and L. A. Flores, "Caracterización de los Parámetros Cinemáticos del Dedo Índice de la Mano," presented at 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Barranquilla, Colombia, 2006.
- [10] N. A. Davidoff, "The development of a graphic model of human hand in: *Industrial Engineering*," The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA 1990.
- [11] N. A. Davidoff and A. Freivalds, "A graphical model of the human hand using CATIA," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 12, pp. 255-264, 1993.
- [12] J. W. Garrett, "Anthropometry of the Air Force Female Hand," Aerospace Medical Division, Air Force Systems Command, Wright-Patterson Air Force Base, OH 1970.
- [13] R. S. Idler, "Anatomy and biomechanics of the digital flexor tendons," *Hand Clinics*, vol. 1, pp. 3-11, 1985.
- [14] Z. M. Li, V. M. Zatsiorsky, and M. L. Latash, "Contribution of the extrinsic and intrinsic hand muscles to the moments in finger joints," *Clinical Biomechanics*, vol. 15, pp. 203-211, 2000.
- [15] A. Freivalds, *Biomechanics of the Upper Limbs: Mechanics, Modeling, and Musculoskeletal Injuries*. Austin, TX: CRC Press, 2004.
- [16] I. Yamano, K. Takemura, and T. Maneo, "Development of Robot Finger for Five Fingered Hand Using Ultrasonic Motors," presented at IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003, Las Vegas, Nevada, 2003.
- [17] M. Ceccarelli, J. Jauregui, and N. Nava, "Experimental Activity for Designing a Hand with 1 DOF Anthropomorphic Fingers of Human Size," presented at 12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'03, Cassino Italy, 2003.
- [18] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, and A. Zucchelli, "Mechanical Structures for Robotic Hands Based on the Compliant Mechanism Concept," presented at 7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA 2002, Noordwijk, Netherlands, 2002.
- [19] T. Iberall, "The nature of human apprehension: Three dexterous hands in one," presented at International Conference on Robotics and Automation, 1987.
- [20] M. R. Cutkosky, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 269-279, 1989.
- [21] W. P. Cooney, M. J. Lucca, E. Y. Chao, and R. L. Linscheid, "The Kinesiology of the Thumb

trapeziometacarpal joint," Journal of Bone & Joint Surgery-America, vol. 63, pp. 1374-1384, 1981.

[22] A. Kapandji, Biomechanics of the Thumb. Philadelphia, PA.: W. B. Saunders Company, 1981.

[23] F. Skinner, "Designing a Multiple Prehension Manipulation"

Mechanical Engineering Society, 1975.

[24] G. Figliolini, P. Rea, and M. Principe, "Mechatronic Design of Ca.U.M.Ha.," presented at 12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'03, Cassino Italy, 2003.

DIGITAL DOT

SERVICIOS

DIGITALES

ELECTRÓNICOS

INTEGRALES

**Producción y posproducción
en audio y video**

**Centenario 3, Col. Del Carmen,
Coyoacán, México, DF.**

5339 5880

5339 5474