

Medición del movimiento de todos los segmentos de la mano mediante videogrametría

J.L. Sancho Bru, M. Vergara, N.J. Jarque Bou, M. Mora Aguilar, A. Pérez González

*Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castellón de la Plana
sancho@emc.uji.es*

La medición del movimiento de la mano es importante en muy diversos campos, a la vez que compleja por el elevado número de grados de libertad que posee. Generalmente es deseable que la técnica de medición no interfiera en el normal desarrollo de las actividades a realizar por la mano, siendo una buena alternativa la captura de movimiento a partir de imágenes de video y uso de marcadores pasivos (o videogrametría). Estas técnicas se han usado ampliamente en el análisis de la marcha, pero su aplicación al análisis del movimiento de la mano es todavía escasa. La mayor parte de los trabajos de la literatura presentan su uso sólo para un dedo, o realizan grandes simplificaciones cinemáticas. En este trabajo se describe un método para la medición de los movimientos de todos los segmentos de la mano a partir del registro de imágenes de video y el uso de 29 marcadores reflectantes, seleccionados para definir unos sistemas de referencia asociados a cada segmento, que se utilizan para calcular los ángulos de rotación entre cada par de segmentos consecutivos. Se ha tenido especial cuidado en el significado fisiológico de estos ángulos de rotación (25 en total). Así, el movimiento de la mano se describe con ángulos de flexión-extensión en todas las articulaciones interfalángicas y en las metacarpocarpianas de los dedos anular y meñique, y con ángulos de flexión-extensión y de abducción-aducción en todas las articulaciones metacarpofalángicas, en la metacarpocarpiana del pulgar y también en la muñeca. Para analizar la repetibilidad y factibilidad del método propuesto, se ha desarrollado un experimento que ha consistido en el agarre de un mismo cono por cinco sujetos distintos. Cada sujeto ha realizado tres repeticiones diferentes del agarre en cada una de las dos sesiones en que se le han colocado los marcadores y se ha realizado su seguimiento. La técnica ha demostrado ser factible para el estudio del movimiento de la mano durante la realización de agarres, con un error de repetibilidad global de 2.3°.

1. INTRODUCCIÓN

La mano es un sistema complejo, compuesto por multitud de huesos interconectados con diferentes articulaciones que le confieren un total de 25 grados de libertad (GDL). Su movimiento suele describirse en los campos clínico y biomecánico por un conjunto de ángulos de rotación fisiológicos (figura 1): flexión/extensión (F/E), abducción/aducción (Ab/Ad) y pronación/supinación (P/S). En las articulaciones interfalángicas distales y proximales (IFD e IFP) de los dedos índice a meñique y en la interfalángica (IF) del pulgar, suele considerarse un único GDL que corresponde a una rotación de F/E [1]. En las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) se consideran dos GDL, correspondientes a rotaciones de F/E y Ab/Ad, ya que sólo permiten una leve rotación de P/S de carácter pasivo [2]. El movimiento de las articulaciones metacarpocarpianas (MCC) es más complejo, combinando F/E, Ab/Ad y P/S, si bien es cierto que la articulación del pulgar funciona básicamente con dos GDL predominantes (F/E y Ab/Ad), que las articulaciones de los dedos índice y medio apenas si presentan movimiento, y que el movimiento de las articulaciones de los dedos anular y meñique es de pequeña amplitud, por lo que suele simplificarse con un único GDL de F/E [2].

La medición del movimiento de la mano es importante en muchos campos, como la evaluación funcional en el diagnóstico patológico, el seguimiento en rehabilitación, el análisis de la técnica deportiva o la evaluación ergonómica del uso de productos. Para su medición se han utilizado diferentes técnicas como los goniómetros, los guantes instrumentados o la captura de movimiento a partir de imágenes [3-6]. Muchas veces, la mayoría, es deseable la medición del movimiento mediante el uso de técnicas que no

interfieran en el normal desarrollo de las actividades a realizar por la mano. En este sentido, las técnicas de captura de movimiento a partir de imágenes de video y mediante el uso de marcadores pasivos (o videogrametría) son una buena alternativa. Estas técnicas visuales se basan en la reconstrucción de las coordenadas de marcadores colocados sobre el segmento a seguir, a partir de imágenes [4,7]. Se han usado ampliamente en el análisis de la marcha, pero su aplicación al análisis del movimiento de la mano es todavía escasa [8]. La mayor parte de los trabajos de la literatura presentan su uso sólo para un dedo [9-10], o realizan grandes simplificaciones cinemáticas [11-13], dadas las dificultades en la medida simultánea del movimiento de todos los segmentos de la mano. Hasta la fecha, no se ha descrito en la literatura ningún método que permita la medición simultánea de los 25 GDL de la mano en movimiento en términos de ángulos de rotación fisiológicos, si bien los autores presentaron en un trabajo previo una técnica para su medición en una postura estática mediante fotogrametría y 61 marcadores dibujados sobre la piel [14]. Sin embargo, el uso de estos marcadores dibujados sobre la piel exigía un gran número de fotografías tomadas desde puntos y orientaciones diferentes para conseguir la reconstrucción tridimensional de las coordenadas de todos los marcadores, lo cual hace inviable su uso en el seguimiento en tiempo real de los movimientos de la mano.

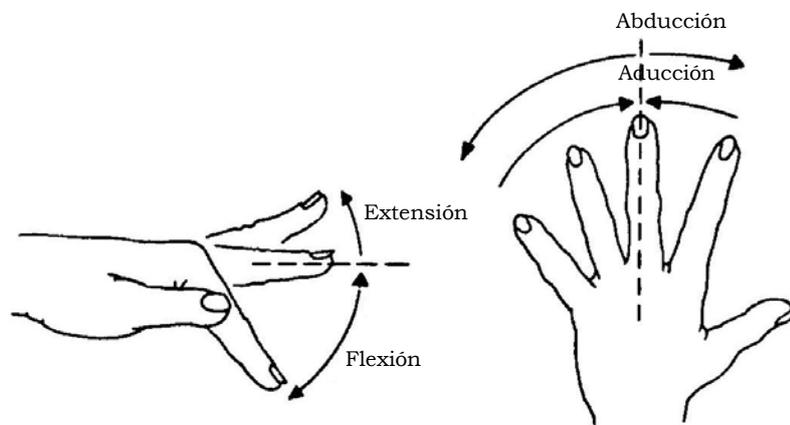


Figura 1. Movimientos de la mano. Ángulos de rotación fisiológicos

En este trabajo se describe un método para la medición de los movimientos de todos los segmentos de la mano, en términos de ángulos fisiológicos de rotación y sin interferir en el comportamiento natural de la mano, a partir del registro de imágenes de video y el uso de marcadores reflectantes. Se demuestra, asimismo, la factibilidad de su uso y su repetibilidad.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Descripción de la técnica

La técnica consiste en: (1) colocación de los marcadores sobre la piel, (2) registro de las posturas de referencia, (3) registro de los movimientos objeto de medición, (4) obtención de las coordenadas 3D de los marcadores, (5) obtención de la orientación 3D de los diferentes segmentos de la mano, y (6) cálculo de los ángulos de rotación fisiológicos.

2.1.1 Colocación de marcadores

Los marcadores reflectantes sobre la piel permitirán definir la posición y orientación de cada uno de los segmentos de la mano. Se han utilizado un total de 29 marcadores, de 3 mm de diámetro, posicionados de tal forma que con un conjunto mínimo se consigue el seguimiento de todos los segmentos. Los marcadores seleccionados se muestran en la figura 2. Se han colocado en el dorso de la mano, para evitar ocultamientos. En los dedos índice a meñique

se han colocado 5 marcadores por dedo: 1 en el extremo de la uña, 2 sobre las articulaciones interfalángicas, 1 sobre el nudillo y el último en la base del metacarpo, todos ellos colocados intentando que queden en un mismo plano cuando se alinea el metacarpo con las falanges de cada dedo en posición de la mano extendida sobre una superficie plana (figura 2.a). Con el pulgar descansando sobre la vertiente lateral de la falange media del dedo índice, en postura relajada, se colocan 5 marcadores sobre él: 4 de ellos se colocan intentando que queden sobre un mismo plano, de forma análoga a la establecida para el resto de dedos: 1 marcador en el extremo de la uña, 1 sobre la articulación IF, 1 sobre la articulación MCF y el último en la base del metacarpo; y el quinto marcador se coloca en la vertiente lateral de la articulación MCF. Finalmente, se colocan 4 marcadores adicionales sobre la muñeca: 2 sobre los procesos estiloides radial y cubital, 1 sobre el dorso de la muñeca alineado con el dedo medio en posición extendida de la mano sobre una superficie plana y con el antebrazo alineado con el dedo medio, y el último marcador sobre el dorso del antebrazo, alineado con él y a unos 2.5 cm del anterior (figura 2.b).

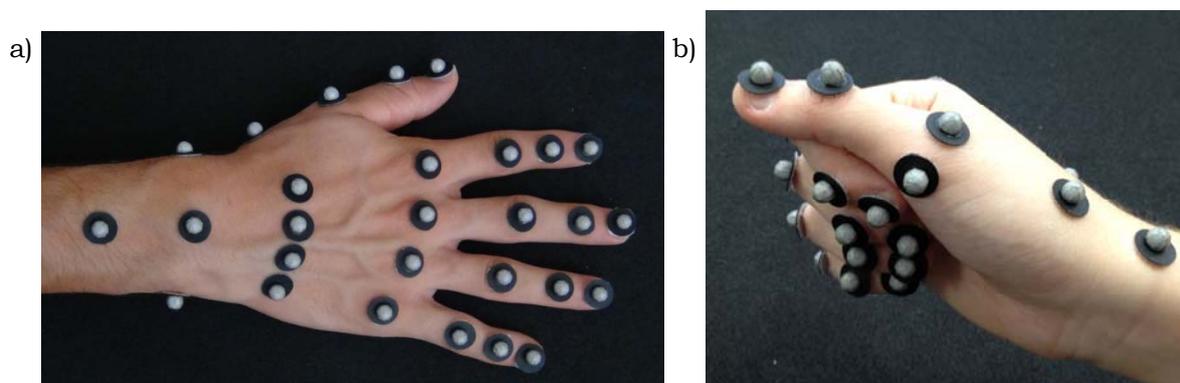


Figura 2. Marcadores utilizados: a) marcadores sobre los dedos índice a meñique y sobre la muñeca; b) marcadores sobre el pulgar.

2.1.2 Definición de posturas de referencia

Para poder conseguir una técnica repetible, los ángulos deben expresarse con respecto a una postura neutra que sea fácil de repetir, de forma que sean comparables las mediciones realizadas en sesiones diferentes con distinta colocación de marcadores. Se han considerado dos posturas de referencia: la postura de referencia para los dedos índice a meñique y para la muñeca corresponde a la postura en la que la mano extendida y el antebrazo descansan sobre una superficie plana, manteniendo los dedos juntos y con el antebrazo alineado con el dedo medio (figura 3); la postura de referencia para el pulgar se obtiene haciendo descansar el pulgar sobre la vertiente lateral de la falange media del dedo índice, en postura relajada (figura 2.b), de acuerdo a la posición neutra para la articulación MCC del pulgar presentada por Smutz et al. [15]. Estas posturas, por otra parte, mostraron su repetibilidad en el trabajo anterior de medición de posturas estáticas por fotogrametría desarrollado por los autores [14], aunque con marcadores distintos y sin considerar la muñeca.



Figura 3. Postura de referencia para los dedos índice a meñique y para la muñeca.

2.1.3 Registro de las posturas de referencia y de los movimientos objeto de medición, y obtención de las coordenadas 3D de los marcadores

Las posturas de referencia y los movimientos de la mano durante la ejecución de la tarea objeto de medición se han registrado utilizando un sistema de *motion tracking* de Vicon consistente en 8 cámaras Bonita de Vicon conectadas a un MX Giganet que proporciona la comunicación entre el ordenador y las cámaras. Toda la captura de movimientos, y su procesamiento se realiza mediante el software Nexus de Vicon. El sistema fue calibrado siguiendo las instrucciones del fabricante, previamente al registro de las posturas. Las 8 cámaras se posicionaron envolviendo el espacio de trabajo a registrar, y a distintas alturas para poder visualizar la mano desde arriba y desde abajo, para que los marcadores fueran siempre visibles en al menos dos de las cámaras, intentando evitar así problemas de ocultaciones de marcadores (ver figura 4). El software Nexus permite el seguimiento automático de los marcadores, y la reconstrucción de sus coordenadas tridimensionales.

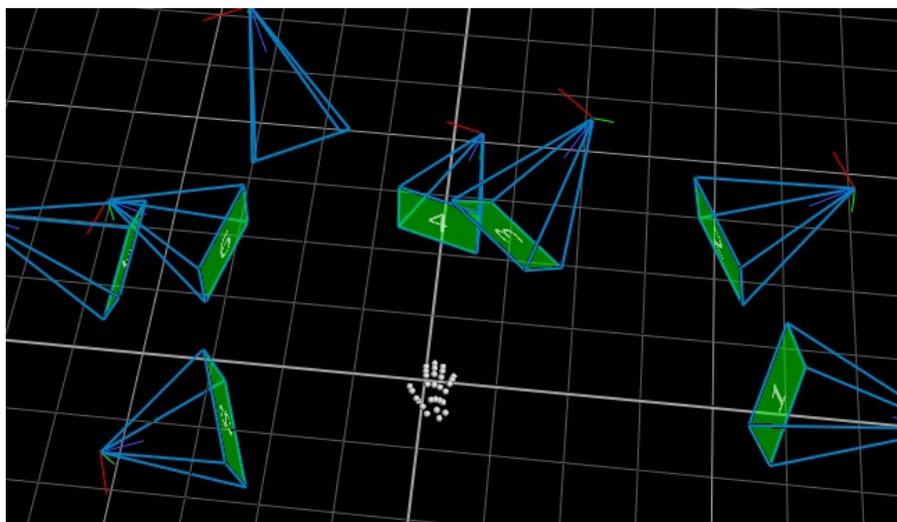


Figura 4. Posicionamiento de las 8 cámaras para evitar ocultamientos de marcadores.

2.1.4 Obtención de la orientación 3D de los diferentes segmentos de la mano y cálculo de los ángulos de rotación fisiológicos

Para descomponer la orientación relativa entre segmentos consecutivos en rotaciones con significado fisiológico, sería necesario conocer la posición y orientación exacta de los ejes anatómicos de rotación. Estos ejes no son estrictamente perpendiculares a los segmentos, ni entre ellos [2]. Sin embargo, estos ejes no son conocidos, y es habitual considerar la aproximación de que los ejes son perpendiculares entre ellos. Con todo ello, se asumió dicha simplificación y se seleccionó un sistema de coordenadas Cartesiano con ejes coincidentes con los de rotación, de forma que una rotación alrededor del eje Z representa un movimiento de F/E, una rotación alrededor del eje X representa un movimiento de Ab/Ad, y finalmente una rotación alrededor del eje Y representa un movimiento de P/S. El cálculo de estos sistemas coordenados se explica a continuación. Para todos los segmentos, los ejes Y se definen positivos en dirección proximal, los ejes X en dirección palmar, y los ejes Z en dirección radial.

Para todos los metacarpos y falanges, se han definido sus ejes Y alineados con los segmentos, para lo que se utilizan los vectores que van del marcador distal al marcador proximal del segmento. Para el antebrazo, se define el eje Y de forma análoga, utilizando los dos marcadores alineados con el eje del antebrazo.

Para los metacarpos de los dedos índice, anular y meñique se define el eje X considerando que los marcadores sobre el metacarpo correspondiente y el marcador sobre el nudillo del dedo medio conforman el plano $X=0$. Para el metacarpo del dedo medio se define el eje X considerando que los marcadores sobre él y el marcador sobre el nudillo del dedo índice

conforman el plano $X=0$. El eje Z en todos los metacarpos se obtiene a partir del producto vectorial $X \times Y$.

Para las falanges proximales de los dedos medio, anular y meñique, se define el eje X considerando que los marcadores sobre la falange correspondiente y el marcador sobre el nudillo del dedo inmediatamente anterior conforman el plano $X=0$. Para la falange proximal del dedo índice se define el eje X considerando que los marcadores sobre ella y el marcador sobre el nudillo del dedo medio conforman el plano $X=0$. El eje Z en todas las falanges proximales se obtiene a partir del producto vectorial $X \times Y$.

Para las falanges medias y distales de los dedos índice a meñique, se calcula el eje X considerando que su eje Y y el eje Z de la falange proximal correspondiente conforman el plano $X=0$. El eje Z en todas las falanges medias y distales se obtiene a partir del producto vectorial $X \times Y$.

En la postura de referencia del pulgar se considera un mismo plano $Z=0$ para los tres segmentos del pulgar, que se obtiene ajustando un plano por mínimos cuadrados para contener los 4 marcadores alineados con el pulgar. El eje X en todos los segmentos del pulgar en dicha postura se obtiene a partir del producto vectorial $Y \times Z$. Adicionalmente, en esta postura de referencia se definen dos vectores auxiliares: un vector que se considera ligado al metacarpo y que une el marcador sobre su base con el marcador situado lateralmente sobre la articulación MCF; y un segundo vector ligado a la falange proximal, que une los dos marcadores sobre la articulación MCF. Se calculan entonces los ángulos que estos vectores forman con los planos $X=0$ de sus respectivos segmentos. En una postura diferente a la de referencia, estos ángulos se utilizan para definir la orientación de los ejes sobre el metacarpo y sobre la falange proximal, obligando a que los vectores definidos por los mismos marcadores formen el mismo ángulo con respecto de los planos $X=0$ en la nueva postura. En la falange distal, por otra parte, se considera que los marcadores sobre esta falange y el marcador sobre la articulación MCF están contenidos en el plano $Z=0$, y el eje X se obtiene del producto vectorial $Y \times Z$.

Para el antebrazo, se ha considerado que el vector que une los marcadores sobre los procesos estiloides y el eje Y del antebrazo conforman el plano $X=0$. El eje Z se obtiene del producto vectorial $X \times Y$.

Los ángulos de rotación en cada articulación se obtienen superponiendo los sistemas de coordenadas proximales de la postura de referencia y de la postura a medir, y calculando los ángulos de rotación entre los sistemas de coordenadas distales de ambas posturas, utilizando para ello la secuencia Z-X-Y del convenio de Euler [16].

La información registrada en ambas posturas de referencia se ha fusionado considerando el metacarpo del dedo índice como elemento de comunión.

2.2. Experimentos de fiabilidad

Se han desarrollado dos experimentos: uno para estudiar la repetibilidad de las posturas de referencia, y otro para analizar la repetibilidad de la técnica propuesta y su factibilidad en la medición dinámica de los movimientos de la mano. Cinco sujetos han participado en ambos experimentos, 3 hombres y 2 mujeres.

Para asegurar la fiabilidad de la técnica, las posturas de referencia deben ser repetibles. Para comprobar su repetibilidad se ha diseñado un test en el que se han medido las posturas de referencia a los 5 sujetos. Tras colocarles los marcadores, se les pidió repetir las posturas de referencia tres veces. El proceso se repitió en dos sesiones diferentes, lo que implica que los marcadores se colocaron un total de 10 veces. Se definió así la variable 'colocación', con valores de 1 a 10. La repetibilidad de las posturas de referencia se ha analizado en términos de los ángulos de rotación necesarios para transformar los sistemas de coordenadas entre segmentos contiguos. Se ha calculado el error de repetibilidad global de estas posturas como el valor medio de las desviaciones estándar residuales (MRSD) en un análisis de varianza (ANOVA) con variable dependiente los ángulos de rotación entre segmentos consecutivos (Z, X, e Y) y factor "colocación x articulación".

La repetibilidad de los ángulos de rotación en la medición de los movimientos de la mano se ha realizado diseñando un test en el que los 5 sujetos han agarrado un cono varias veces (figura 5), prestando especial atención a que cada sujeto cogiera el cono cada vez de la misma forma: el cono descansando en el mismo punto sobre la mesa, y los dedos a la misma altura del cono, aunque pudo haber pequeñas diferencias. Cada sujeto agarró tres veces el cono. Y este proceso se repitió en un día diferente, con una nueva colocación de marcadores. El error de repetibilidad se estimó como el valor MRSD en un ANOVA con variable dependiente los ángulos fisiológicos medidos, y factor “sujeto x articulación x día”.

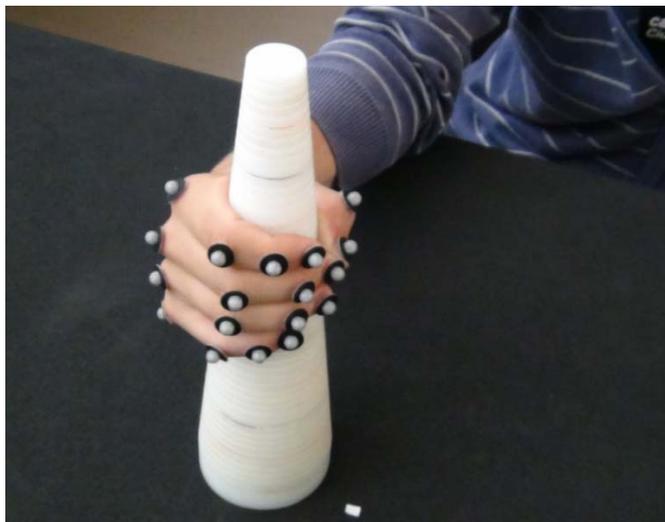


Figura 5. Test de agarre del cono.

Para analizar la bondad de los ejes considerados para la obtención de los ángulos fisiológicos, se ha considerado como ángulos residuales a todos aquellos que en principio no se corresponden con los GDL de cada articulación (por ejemplo, la Ab/Ad y la P/S en la articulación IFD del dedo índice). El valor absoluto de estos ángulos en cada articulación da idea del error asociado a la selección de los ejes de rotación en dicha articulación. El error global atribuido a la selección de los ejes de rotación se ha obtenido como el valor medio de todos estos ángulos residuales en valor absoluto.

Finalmente, se analizó la factibilidad de la técnica para el registro dinámico de la postura de la mano (movimientos), por observación de posibles pérdidas de información por ocultación de marcadores y de posibles problemas en el seguimiento automático.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El error de repetibilidad global (MRSD) de las posturas de referencia, obtenido del ANOVA correspondiente, ha sido de 1.72° , de lo que se puede concluir que las posturas de referencia seleccionadas son repetibles, ya que los errores son muy pequeños.

Por otra parte, el error de repetibilidad global (MRSD) de medición de las posturas de agarre del cono, obtenido del segundo ANOVA, ha sido de 2.33° , lo que indica una elevada repetibilidad de la técnica, que unido a la repetibilidad de las posturas de referencia permiten asegurar la fiabilidad de la técnica descrita.

El error global atribuido a la selección de los ejes de rotación, obtenido como el valor medio de todos los ángulos residuales en valor absoluto, ha resultado ser de sólo 6.68° , con una desviación estándar de 8.04° . Este resultado nos permite afirmar que la selección de ejes realizada ha sido exitosa.

Para ejemplificar el uso de la técnica en el registro dinámico del movimiento de la mano, se muestra en la figura 6 la evolución de los ángulos fisiológicos de rotación calculados sobre las articulaciones del dedo índice durante una de las repeticiones del agarre del cono para uno de los sujetos. Se puede comprobar que la forma de las curvas es la esperada, en donde el dedo parte de una postura extendida para ir flexionándose hasta abrazar el cono. Con las

8 cámaras utilizadas dispuestas como se muestra en la figura 4, no se han tenido problemas de ocultamientos de marcadores, y el procesamiento automático de seguimiento de los marcadores con el software Nexus del sistema Vicon se ha realizado sin problemas.

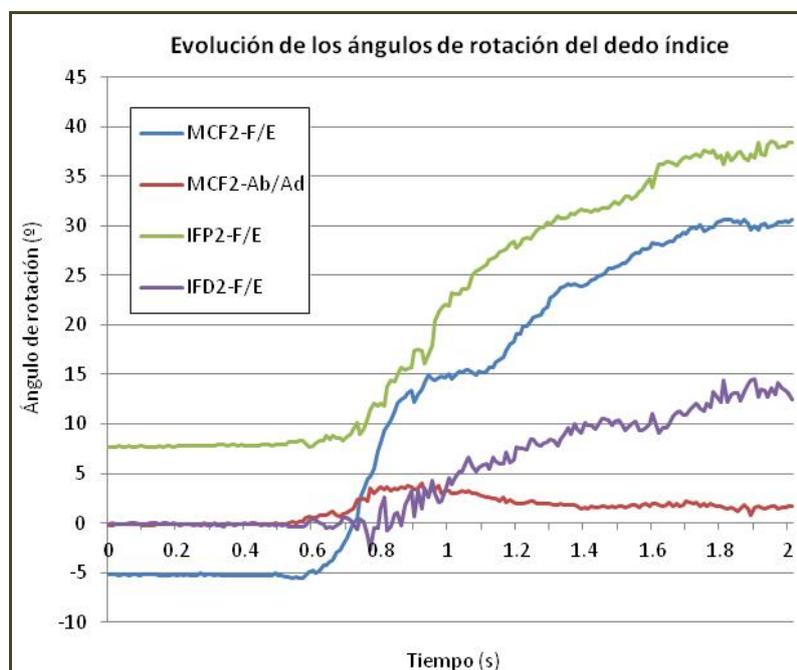


Figura 6. Evolución de los ángulos de rotación fisiológicos sobre el dedo índice en una de las realizaciones de agarre del cono.

4. CONCLUSIONES

La técnica desarrollada está basada en la reconstrucción de coordenadas 3D de marcadores reflectantes colocados sobre el dorso de la mano y registrados mediante videogrametría. Se obtienen las coordenadas de estos marcadores en las posturas de referencia y en las posturas a medir, y se utilizan para definir unos sistemas de coordenadas en cada segmento que permiten calcular los ángulos de rotación en las articulaciones expresados según la terminología habitual utilizada en biomecánica y ergonomía.

Los errores de repetibilidad son pequeños, lo cual es un indicador de la fiabilidad de la técnica. Además, también son pequeños los ángulos residuales, por lo que los ejes seleccionados para expresar las rotaciones pueden considerarse apropiados.

La técnica desarrollada cumple los requisitos para ser utilizada en la medición de los movimientos de la mano de forma no invasiva, ha demostrado ser suficientemente fiable y es más completa que otras técnicas, ya que permite medir todos los movimientos de todos los segmentos de la mano.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación y de FEDER, a través del proyecto DPI2010-18177, en el que se enmarca parcialmente esta investigación.

6. REFERENCIAS

- [1] J.M. Dubousset. The digital joints. En: Tubiana R., ed. 'The hand'. Volumen 1. Philadelphia: Saunders Company, 1981; 191-201
- [2] P.W. Brand, A.M. Hollister. Clinical Mechanics of the Hand. Second Edition. St. Louis: Mosby - Year Book, Inc., 1992.
- [3] J.W. Lee, K. Rim. Measurement of finger joint angles and maximum finger forces during cylinder grip activity. J. Biomed. Eng. 1991; 13:152-162.

- [4] G.S. Rash, P.P. Belliappa, M.P. Wachowiak, N.N. Somia, A. Gupta. A demonstration of the validity of a 3-D video motion analysis method for measuring finger flexion and extension. *Journal of Biomechanics* 1999; 32:1337-1341
- [5] M.H. Yun, A. Freivalds. Analysis of tool grip tasks using a 3D glove. (In: Kumar S. ed. 'Advances in Occupational Ergonomics and Safety 2'.) Amsterdam: IOS Press, 1998; 401-404
- [6] H. Hsiao, W.M. Keyserling. A three-dimensional ultrasonic system for posture measurement. *Ergonomics* 1990; 33(9):1089-1114
- [7] C.F. Small, D.R. Pichora, J.T. Bryant, P.M. Griffiths. Precision and accuracy of bone landmarks in characterizing hand and wrist position. *J Biomed Eng.* 1993 Sep; 15(5):371-378.
- [8] A. Erol, G. Bebis, M. Nicolescu, R.D. Boyle, X. Twombly. A review on vision-based full DOF hand motion estimation, *IEEE CS Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 10.1109/CVPR.2005.395 (2005).
- [9] H.Y. Chiu, S.C. Lin, F.C. Su, S.T. Wang, H.Y. Hsu. The use of the motion analysis system for evaluation of loss of movement in the finger, *J Hand Surg*, 25 (2000), 195-199.
- [10] L.C. Kuo, F.C. Su, H.Y. Chiu, C.Y. Yu. Feasibility of using a video-based motion analysis system for measuring thumb kinematics, *J Biomech*, 35 (2002), 1499-1506.
- [11] D. Brero, M. Prado. Desarrollo de un modelo biomecánico multicuerpo de la mano y aplicación a la caracterización de su movimiento con técnicas de estéreo videogrametría, *CIBIM* 10, (2011), 2515-2526.
- [12] I. Carpinella, P. Mazzoleni, M. Rabuffetti, R. Thorsen, M. Ferrarin. Experimental protocol for the kinematic analysis of the hand: definition and repeatability, *Gait Posture*, 23 (2006), 445-454.
- [13] P. Cerveri, E. De Momi, N. Lopomo, G. Baud-Bovy, R.M. Barros, G. Ferrigno. Finger kinematic modeling and real time hand motion estimation, *Ann Biomed Eng*, 31 (2007), 1989-2002.
- [14] M. Vergara, J.L. Sancho-Bru, A. Pérez-González. Description and validation of a non-invasive technique to measure the posture of all hand segments, *J Biomech Eng*, 125 (2003), 917-922.
- [15] W.P. Smutz, A. Kongsayreepong, R.E. Hughes, G. Niebur, W.P. Cooney, K.N. An. Mechanical advantage of the thumb muscles. *Journal of Biomechanics* 1998; 31:565-570.
- [16] C.F. Small, J.T. Bryant, D.R. Pichora. Rationalization of kinematic descriptors for three-dimensional hand and finger motion. *J Biomed Eng.* 1992 Mar; 14(2):133-141.