

Indicadores de la calidad del agarre humano: rangos de variabilidad y análisis de sensibilidad

B.E. León Pinzón⁽¹⁾, J.L. Sancho Bru⁽²⁾, A. Morales Escrig⁽¹⁾, A. Pérez González⁽²⁾

*(1) Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Computadores. Universitat Jaume I
beatriz.leon@uji.es*

(2) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I

En la literatura encontramos modelos biomecánicos de la mano humana desarrollados para proporcionar una herramienta para el estudio de problemas que no pueden ser analizados directamente sobre las personas, o cuyo coste sería elevado. Una de las características principales de la mano humana es su capacidad de agarre, pero los modelos desarrollados hasta la fecha están muy limitados en cuanto a su simulación. La incorporación a los modelos biomecánicos de la posibilidad de calcular indicadores de calidad del agarre que permitan evaluarlo desde diferentes puntos de vista y poder así escoger el más adecuado, es fundamental. Estos indicadores pueden ser utilizados con diferentes propósitos, como puede ser la mejora del diseño de manos protésicas por comparación de la calidad del agarre desarrollado por la mano mecánica en relación a la mano natural. En trabajos recientes los autores han propuesto la adaptación de los indicadores de calidad del agarre robóticos para la evaluación del agarre humano. Estos indicadores dan idea de diferentes aspectos, como son la capacidad para resistir perturbaciones externas o la destreza que permite el agarre. La variada naturaleza de estos indicadores hace que vengan expresados con unidades dimensionales y rangos de variación bien distintos y poco conocidos. A la hora de poder comparar la bondad de un agarre, sería bueno conocer el rango de la posible variación de estos indicadores y la sensibilidad de dichos indicadores ante pequeñas variaciones en los parámetros que utilizan para su cálculo. En este trabajo presentamos los resultados de las simulaciones realizadas en un barrido de diferentes agarres para cilindros de tres diámetros diferentes. Se presentan los resultados del cálculo de 10 indicadores de calidad diferentes, analizándose los rangos de variabilidad y la sensibilidad a diferentes parámetros de entrada.

1. INTRODUCCIÓN

En la literatura encontramos multitud de modelos biomecánicos de la mano humana desarrollados para proporcionar una herramienta para el estudio de problemas que no pueden ser analizados directamente sobre las personas, o cuyo coste sería elevado. Una de las características principales de la mano humana es su capacidad de agarre. Sin embargo, los modelos desarrollados hasta la fecha están muy limitados en cuanto su simulación.

La incorporación a los modelos biomecánicos de la posibilidad de calcular indicadores de calidad del agarre que permitan evaluarlo desde diferentes puntos de vista y poder así escoger el más adecuado, es fundamental para que estos modelos pudieran ser utilizados con diferentes finalidades. Por ejemplo, como herramienta de apoyo en la mejora del diseño de manos protésicas por comparación de la calidad del agarre desarrollado por la mano mecánica en relación a la mano natural.

Por otra parte, el agarre robótico viene siendo estudiado desde hace muchos años, habiéndose propuesto diferentes indicadores que dan idea de la capacidad del agarre para resistir perturbaciones externas o de la destreza que permite. En este sentido, en trabajos recientes [1] los autores han propuesto la adaptación de estos indicadores robóticos para la evaluación del agarre humano. Su variada naturaleza hace que vengan expresados con unidades dimensionales y rangos de variación bien distintos y poco conocidos. A la hora de poder comparar la bondad de un agarre, sería bueno conocer el rango de la posible variación de estos indicadores y la sensibilidad de dichos indicadores ante pequeñas

variaciones en los parámetros que utilizan para su cálculo (puntos de contacto, normales de contacto, posturas, etc). El análisis de dicha información permitirá valorar la viabilidad del uso de estos indicadores para evaluar la ventaja relativa entre diferentes agarres.

En este trabajo presentamos los resultados de las simulaciones realizadas en un barrido de diferentes agarres para cilindros de tres diámetros diferentes. Se presentan los resultados del cálculo de 10 indicadores de calidad diferentes, analizándose los rangos de variabilidad y la sensibilidad a diferentes parámetros de entrada.

2. MEDIDAS DE CALIDAD DEL AGARRE

2.1. Nociones básicas del agarre robótico

En esta sección se detallan las definiciones básicas del agarre robótico imprescindibles para comprender las definiciones de los indicadores de calidad estudiados.

El propósito del agarre es restringir los movimientos potenciales del objeto cuando existen fuerzas externas. En robótica se define como un conjunto de contactos en la superficie del objeto agarrado. La fuerza $f_i \in \mathbb{R}^3$ aplicada por un dedo en el punto de contacto c_i expresado en el sistema de referencia del objeto, genera un momento $\tau_i \in \mathbb{R}^3$ sobre el centro de masa del objeto. Esto se representa con una fuerza generalizada $w_i \in \mathbb{R}^6$ (*wrench*) en el objeto con componentes de fuerza y momento, y que generalmente se expresa por unidad de fuerza sobre la normal al contacto n_i :

$$\omega_i = \begin{pmatrix} f_i \\ \tau_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_i \\ c_i \times n_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

Es más, como las fuerzas y momentos tienen diferentes unidades, se puede considerar un parámetro ρ que permite escalar la magnitud del momento con respecto a la de la fuerza. En este trabajo se ha considerado ρ como la mayor distancia desde el centro de masa del objeto a cualquier punto en la superficie del objeto, como se describe en [2]:

$$\omega_i = \begin{pmatrix} f_i \\ \tau_i / \rho \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_i \\ c_i \times n_i / \rho \end{pmatrix} \quad (2)$$

Las fuerzas que pueden ser transmitidas a través del contacto se relacionan con las fuerzas generalizadas resultantes w_i sobre el objeto, y esta relación depende de la geometría de las superficies de contacto y las propiedades del material de los objetos, lo cual determina su fricción y la posible deformación del contacto[3]. Esta relación se considera a través de un modelo de contacto. En este caso, se ha considerado un modelo de contacto con fricción utilizando un coeficiente de fricción $\mu=0.8$.

La matriz de agarre (G) y el Jacobiano de la mano (J_h) definen las propiedades relevantes de velocidad y transmisión de fuerza de los contactos [3]. La transpuesta de la matriz de agarre (G^T) relaciona la fuerza generalizada en el objeto con las fuerzas en las puntas de los dedos. El Jacobiano de la mano (J_h) relaciona la velocidad en las articulaciones de la mano con las velocidades en las puntas de los dedos. El Jacobiano mano-objeto $H = (G^+)^T J_h$ relaciona las velocidades de la mano con las del objeto, donde G^+ es la inversa generalizada de G .

Antes de evaluar la calidad de un agarre es básico comprobar si dicho agarre permite limitar los movimientos del objeto manipulado y aplicar fuerzas arbitrarias en los contactos sin violar las restricciones de fricción en estos[4]. Para ellos se utiliza el concepto de agarre en cierre de fuerza (*force-closure*), que se da si los dedos pueden aplicar, a través del conjunto de contactos, fuerzas generalizadas arbitrarias al objeto, lo cual significa que cualquier movimiento del objeto puede ser resistido por las fuerzas de contacto [5].

Un espacio de fuerzas de agarre generalizadas (GWS) es el espacio de fuerzas generalizadas que pueden ser aplicadas al objeto en cada punto de contacto. El límite de este espacio de fuerzas puede ser calculado como un casco convexo. El cierre de fuerza puede ser determinado evaluando si el origen del casco convexo cae dentro de este casco [6]. Basados

en las condiciones anteriores, se han propuesto muchas pruebas para la comprobación del cierre de fuerza, siendo el propuesto por [7] el más usado. Ellos proponen calcular el radio de la máxima esfera inscrita en el casco convexo centrado en su origen y verificar si es mayor que cero.

2.2. Medidas de calidad de agarre robóticas

Se han implementado 10 medidas de calidad del agarre comúnmente utilizadas en robótica, que se presentan clasificadas en cuatro grupos. Algunas de ellas se centran en evaluar la habilidad de resistir perturbaciones externas, otras en evaluar la destreza. Se presenta en esta sección una breve descripción de cada una de estas medidas (ver [8] para una descripción detallada) y su adaptación a la evaluación del agarre humano, indicando sus unidades y rangos, y, cuando es posible, se propone su normalización (denotado en adelante con el subíndice N) de tal forma que todas tengan su mejor valor 1 y su peor valor 0.

Grupo A: Propiedades algebraicas de G

Son indicadores de estabilidad que consideran las propiedades algebraicas de la matriz G para medir la capacidad del agarre de resistir fuerzas externas. No consideran ninguna limitación en las fuerzas de los dedos, por lo que en algunos casos los dedos tienen que aplicar fuerzas extremadamente grandes para resistir pequeñas perturbaciones.

Q_{A1} – *Valor singular mínimo de G*: Mide lo lejos que se encuentra la configuración del agarre de caer en una configuración singular, perdiendo la capacidad de resistir fuerzas externas [9]. Cuando un agarre se encuentra en una configuración singular, al menos uno de los valores singulares se hace cero. Se calcula como:

$$Q_{A1} = \sigma_{\min}(G) \quad (3)$$

donde $\sigma_{\min}(G)$ es el valor singular mínimo de G . Tiene que ser maximizada y no tiene unidades. Su límite inferior es cero y su límite superior no está determinado.

Q_{A2} – *Volumen del elipsoide en el espacio de fuerzas generalizadas*: Da una idea de la contribución global de las fuerzas de contacto [9] y puede calcularse como:

$$Q_{A2} = \beta \sqrt{\det(GG^T)} = \beta(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_6) \quad (4)$$

donde $\beta > 0$ es una constante y σ_i son los valores singulares de la matriz G . Debe ser maximizada y no tiene unidades. El límite inferior es cero y el superior no está determinado.

Q_{A3} – *Índice de isotropía del agarre*: busca una contribución uniforme de los fuerzas de contacto en la fuerza generalizada global ejercida sobre el objeto [10], y se calcula como:

$$Q_{A3} = \frac{\sigma_{\min}(G)}{\sigma_{\max}(G)} \quad (5)$$

donde $\sigma_{\min}(G)$ y $\sigma_{\max}(G)$ son los valores singulares mínimos y máximos de la matriz G . Tiene que ser maximizada y no tiene unidades. Se acerca a uno en una configuración isotrópica y es igual a cero en una configuración singular. Ya se encuentra normalizada entre el rango deseado de 0 a 1 ($Q_{A3N} = Q_{A3}$).

Grupo B: Localización de los puntos de contacto

Son indicadores de estabilidad, que asumen mejor estabilidad cuando los puntos de contacto están distribuidos uniformemente en la superficie y cerca del centro de masa del objeto con el objetivo de minimizar los efectos de las fuerzas de gravedad y de inercia.

Q_{B1} – *Distancia entre el centroide de los puntos de contacto y el centro de masa del objeto*: Intenta minimizar el efecto de las fuerzas gravitacionales y de inercia durante el movimiento del robot midiendo la distancia entre el centro de masa g_o del objeto agarrado y el centroide de los puntos de contacto g_c [11], [12]:

$$Q_{B1} = \text{distancia}(g_o, g_c) \quad (6)$$

Tiene que ser minimizada y tiene unidades de longitud. Su límite inferior es cero y su límite superior proponemos calcularlo como la máxima distancia desde el centro de masas del objeto a cualquier punto en su superficie ($distancia_{max}$). Esto se ha realizado creando una caja envolvente sobre el objeto y calculando la distancia entre el centro y una de sus esquinas. Así, $Q_{B1N} = 1 - (Q_{B1} / distancia_{max})$.

Q_{B2} – *Área del polígono de agarre*: En agarres robóticos con tres dedos, un triángulo grande formado por los puntos de contacto da una idea de un agarre robusto, ya que con las mismas fuerzas de contacto el agarre puede resistir mayores momentos externos [13]. Para los cinco dedos de la mano humana, se puede extender este indicador considerando un plano generado seleccionando tres dedos (pulgarc, índice y medio) y proyectando sobre él los contactos de los otros dos dedos [14]. Este indicador se calcula como:

$$Q_{B2} = Area (Polígono (p1, p2, p3, p4_p, p5_p)) \quad (7)$$

donde p1, p2, p3 son los puntos de contacto de los dedos pulgar, índice y medio, y p4p, p5p son los puntos proyectados del anular y meñique. Debe ser maximizado y tiene unidades de área. Proponemos su normalización teniendo en cuenta que su límite inferior es cero y el superior ($Area_{max}$) se puede calcular como el área cuando la mano se encuentra con todas sus articulaciones en sus límites máximos de abducción. Entonces: $Q_{B2N} = Q_{B2} / Area_{max}$.

Q_{B3} – *Forma del polígono de agarre*: Se define para polígonos de agarre planos y compara lo lejos que se encuentran los ángulos internos del polígono de agarre de los correspondientes a un polígono regular [10]. Para los cinco dedos de la mano humana, el polígono plano se obtuvo de la misma forma que para Q_{B2} . Este indicador se calcula como:

$$Q_{B3} = \frac{1}{\theta_{max}} \sum_{i=1}^{n_f} |\theta_i - \bar{\theta}| \quad (8)$$

donde n_f representa el número de dedos, θ_i el ángulo interno en el vértice i del polígono. $\bar{\theta}$ representa el ángulo del polígono regular y θ_{max} es la suma de las diferencias entre los ángulos internos cuando el polígono tiene la peor condición (línea recta) y los del polígono regular. Esta medida debe ser minimizada y su límite superior es 1, por lo que la adaptamos: $Q_{B3N} = 1 - Q_{B3}$.

Grupo C: Magnitud de las fuerzas

Son indicadores de estabilidad que tienen en cuenta la magnitud de las fuerzas aplicadas en los contactos, ya que en realidad existen límites en las fuerzas que los dedos pueden aplicar.

Q_{C1} – *Mínima perturbación resistida*: Se define como la mayor fuerza generalizada que el agarre puede resistir independientemente de su dirección [7]. Las magnitudes de las fuerzas se limitan a 1. La máxima fuerza generalizada $\omega \in GWS$ se encuentra en su frontera, por lo que la medida de calidad se calcula como el radio de la máxima esfera contenida en GWS:

$$Q_{C1} = \min_{\omega \in Frontera (GWS)} \|\omega\| \quad (9)$$

Tiene que ser maximizada y tiene unidades de fuerza si se ha dividido el momento por el parámetro ρ . En este trabajo se escogió como origen del sistema de referencia el centro de masa del objeto, y ρ como $distancia_{max}$ definida anteriormente. El límite máximo de este indicador es $\sqrt{2}$ y el mínimo es cero, por lo que la normalizamos como: $Q_{C1N} = Q_{C1} / \sqrt{2}$.

Q_{C2} – *Volumen del GWS*: Se calcula midiendo el volumen de la frontera del GWS [15]:

$$Q_{C2} = Volumen (GWS) \quad (10)$$

El sistema de referencia y ρ se definieron como para la medida anterior. Tiene que ser maximizado y tiene unidades de [fuerza]⁶. Su límite inferior es cero y el superior no está determinado, si bien en un trabajo reciente utilizamos el método de Monte Carlo para estimarlo[1], obteniendo $Volumen_{max} = 0.7673 N^6$, con lo que: $Q_{C2N} = Q_{C2} / Volumen_{max}$.

Grupo D: Configuración del manipulador

La manipulabilidad de un robot describe su habilidad para alcanzar diferentes posiciones y por su capacidad de cambiar su posición y orientación a una configuración dada [16]. Muchas de las medidas robóticas propuestas en la literatura tienen en cuenta los valores singulares del Jacobiano J del manipulador y otros penalizan las articulaciones de la mano que se encuentran cerca de sus máximos límites.

Q_{D1} – *Postura de las articulaciones de los dedos*: Mide lo lejos que cada articulación se encuentra de sus límites [17]. Se calcula con:

$$Q_{D1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - a_i}{R_i} \right)^2, \quad R_i = \begin{cases} a_i - y_{im} & \text{si } y_i < a_i \\ y_{iM} - a_i & \text{si } y_i > a_i \end{cases} \quad (11)$$

donde n es el número de articulaciones y a_i es la postura óptima de la mano. R_i es el rango de movimiento de cada articulación entre a_i y su límite máximo o mínimo, y_{iM} e y_{im} . La postura óptima a_i se ha definido cuando la mano se encuentra relajada [18]. Tiene que ser minimizado, y se encuentra normalizado, pero ha sido modificado para tener 1 como su mejor valor: $Q_{D1N} = 1 - Q_{D1}$.

Q_{D2} – *Inverso del número de condición de H* : El número de condición de una matriz se define como la relación de sus valores singulares máximo y mínimo. Para el Jacobiano, el inverso del número de condición da una medida de la sensibilidad en las magnitudes de la velocidad del manipulador a la dirección del vector de velocidad. Es una medida de destreza que considera la capacidad de la mano de mover un objeto en cualquier dirección con la misma ganancia [8]:

$$Q_{D2} = \frac{\sigma_{\min}(H)}{\sigma_{\max}(H)} \quad (13)$$

donde σ_{\min} y σ_{\max} son los valores singulares mínimos y máximos de la matriz del Jacobiano mano objeto H . Debe ser maximizada y no tiene unidades. Su límite inferior es cero y el superior uno, por lo que: $Q_{D2N} = Q_{D2}$.

2.3. Descripción del modelo cinemático

En esta sección se describe brevemente el modelo cinemático de la mano desarrollado y validado por los autores en trabajos previos. Es un modelo tridimensional que utiliza los parámetros antropométricos longitud de la mano (LM) y ancho de la mano (AM) para el escalado de los diferentes componentes (figura 1).

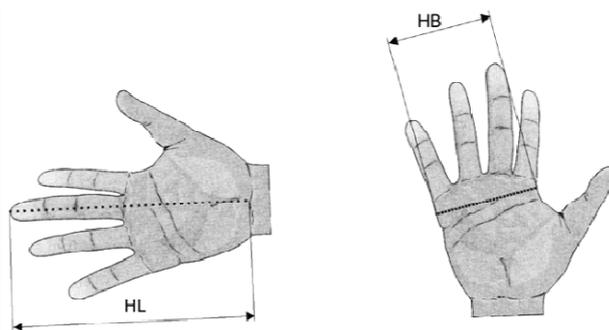


Figura 1. Parámetros de escalado del modelo: LM (longitud de la mano) y AM (ancho de la mano)

El modelo considera un total de 23 gdl, seleccionados de forma que permite simular de forma realista los movimientos de la mano. Se han considerado cinco cadenas esqueléticas abiertas de sólidos rígidos (los huesos) conectadas al carpo a través de diferentes articulaciones. Las articulaciones interfalángicas proximales y distales (IFP e IFD) de los dedos índice a meñique y la interfalángica (IF) del pulgar son de tipo troclear, permitiendo sólo movimientos de flexo-extensión [19], por lo que se han modelado considerando una articulación de revolución que conecta las falanges adyacentes. Las articulaciones

metacarpofalángicas (MCF) de todos los dedos son de tipo condilar, permitiendo movimientos de flexo-extensión y de abducción-aducción. La articulación metacarpocarpiana (MCC) del pulgar es una articulación en silla de montar, que permite también movimientos de flexo-extensión y de abducción-aducción[19]. Todas estas articulaciones se han modelado considerando 2 gdl, mediante juntas universales. Finalmente, el modelo permite el arqueado de la palma mediante el modelado de las articulaciones MCC de los dedos anular y meñique como articulaciones de revolución.

El modelo está implementado en el entorno de simulación robótico OpenRAVE [20] (figura 2), junto con todos los indicadores descritos anteriormente.

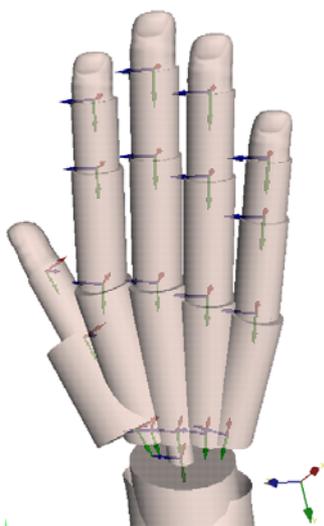


Figura 2. Modelo cinemático de la mano humana implementado en OpenRAVE

3. ANÁLISIS DE VARIABILIDAD Y SENSIBILIDAD

Aunque para muchos indicadores detallados en la sección 3 se han propuesto formas de normalizarlos teniendo en cuenta sus límites matemáticos, en la realidad estos rangos pueden ser mucho menores si se tiene en cuenta la variedad de agarres que un humano puede realizar. El estudio de la variabilidad de estos indicadores permitiría reducir estos rangos y, por lo tanto, conseguir una mejor normalización de estas medidas de calidad, lo que contribuiría a la hora de plantearse el combinar varios de ellos para obtener un indicador global del agarre.

Por otra parte, todos los indicadores presentados utilizan la postura de agarre como parámetro de entrada y OpenRAVE calcula a partir de ella tanto los puntos de contacto como las normales de contacto necesarias para todos ellos. Los ángulos que conforman cada postura se obtienen actualmente registrando experimentalmente la postura de la mano al realizar el agarre. Esto se puede hacer con la ayuda de diferentes sensores, tales como el sistema de captura de movimiento Vicon [21] o el guante CyberGlove®. Estos sistemas tienen errores de incertidumbre en la medición, por lo que es conveniente determinar los sensibles que son los indicadores a posibles variaciones en las posturas de entrada. En este trabajo, las posturas de agarre se han obtenido usando el sistema Vicon.

3.1. Experimentos

3.1.1. Análisis de variabilidad

Se han seleccionado tres cilindros de diámetros diferentes (25 mm, 50 mm y 75 mm), y sobre ellos se han simulado tres tipos de agarre de pinza diferente: cilíndrico, en garra y lateral. Para cada uno de ellos, se ha simulado el agarre del cilindro sobre su centro de masas y sobre uno de sus extremos (figura 3). Para cada una de estas 18 posturas resultantes, se calcularon los 10 indicadores de calidad del agarre y se determinaron sus rangos de variabilidad.

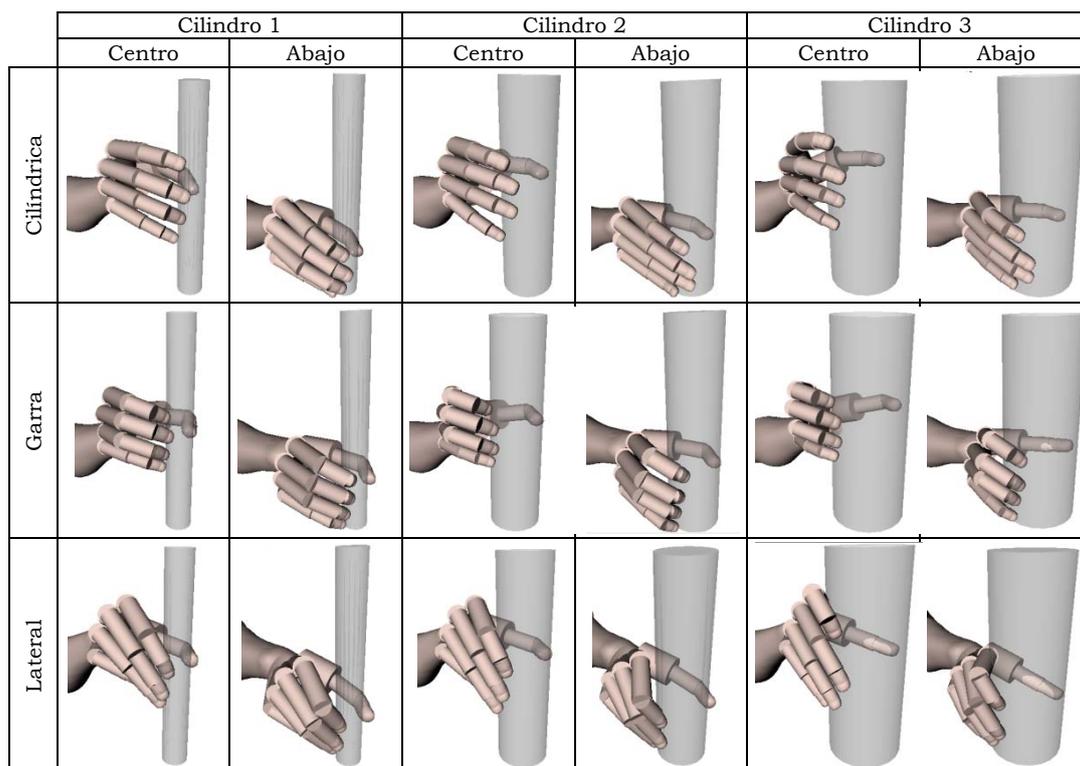


Figura 3. Posturas utilizadas para realizar el análisis de variabilidad

3.1.2. Análisis de sensibilidad

Se ha considerado nuevamente el agarre de los tres cilindros del apartado anterior, y se ha simulado su agarre con la postura de pinza cilíndrica y sobre el centro de masas del cilindro (agarres 1, 3 y 5 de la primera fila de la figura 3). Para cada una de estas posturas, consideradas como referencia, se introdujeron variaciones en cada una de sus articulaciones utilizando un muestreo aleatorio en un intervalo de $\pm 5\%$ de su rango de movimiento. Se utilizaron 500 variaciones de la postura original para cada uno de los cilindros. Para cada una de estas nuevas posturas se realizó el cálculo de los 10 índices de calidad de agarre y se calculó su sensibilidad analizando su variación con respecto del valor obtenido para las posturas de referencia. El índice de sensibilidad global (ISG) para cada medida se obtuvo como la raíz cuadrada de la desviación cuadrática media con respecto del valor del indicador calculado en la postura de referencia.

3.2. Resultados y discusión

3.2.1. Variabilidad

Los valores extremos de los indicadores para las posturas seleccionadas se presentan en la tabla 1. Se puede observar que, para los agarres estudiados, la mayoría de los valores de los indicadores normalizados cubren un intervalo muy pequeño dentro de su hipotético rango de variación. Parece improbable que, aunque se considere un conjunto mayor de agarres posibles, se llegue a cubrir dicho rango en su totalidad. Un experimento más exhaustivo que abarcara toda la tipología de agarres que puede realizar la mano podría permitir determinar un rango más realista de variación con el que proponer una normalización que permitiera una comparación entre ellos más coherente. Además, podría servir para conseguir normalizar aquellos indicadores para los que todavía no se ha propuesto su normalización.

	Q_{A1}	Q_{A2}	Q_{A3N}	Q_{B1N}	Q_{B2N}	Q_{B3N}	Q_{C1N}	Q_{C2N}	Q_{D1N}	Q_{D2N}
Mínimo	0.0203	0.4178	0.0091	0.2951	0.0459	0.3242	0.0079	0.0012	0.6780	0.0006
Máximo	0.4223	8.2671	0.1863	0.9192	0.3244	0.5537	0.0572	0.0176	0.8874	0.0061

Tabla 1. Valores extremos de las medidas de calidad para las posturas 18 estudiadas

3.2.2. Sensibilidad

Los valores del índice de sensibilidad *ISG* obtenidos para los 10 indicadores robóticos pueden verse en la figura 4a para cada uno de los tres cilindros. Para las medidas normalizadas (todas a excepción de Q_{A1} y Q_{A2}), el *ISG* da idea del tanto por uno de variación del indicador. Para el resto, *ISG* sólo es útil si se compara con el rango de variación de la medida, para poder saber en qué porcentaje varía el indicador. En la figura 4b se puede ver mejor la variación porcentual de los indicadores normalizados. Del gráfico se desprende que ninguno de los indicadores varía en más de un 5%, siendo el más sensible Q_{A3N} . Por tanto, todos los indicadores normalizados serían bastante robustos frente a errores de incertidumbre en la postura de agarre como dato de entrada. Sin embargo, si tenemos en cuenta los resultados obtenidos del análisis de variabilidad, esto puede no ser tanto así, en cuanto que los rangos considerados para la normalización pueden estar sobrevalorados con respecto de los reales posibles. Así por ejemplo, Q_{A3N} ha experimentado una variación correspondiente al 22.6% de su rango de variabilidad observado en este estudio, lo cual aporta fragilidad al uso de este indicador.

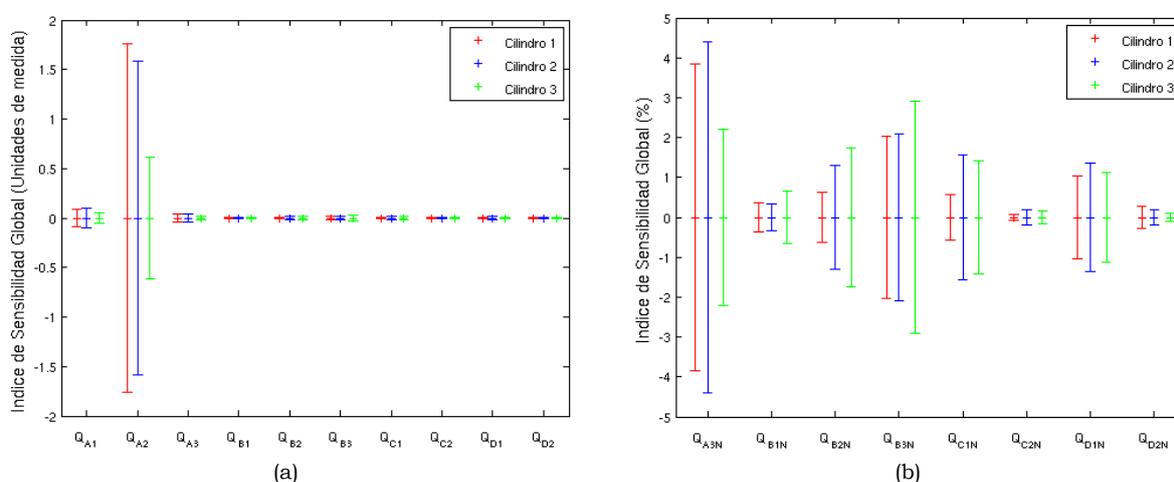


Figura 4. Resultados del análisis de sensibilidad: a) *ISG* de todos los indicadores; b) *ISG* (%) de los indicadores normalizados.

4. CONCLUSIONES

Se ha calculado el rango de variabilidad de 10 indicadores robóticos en la evaluación de agarres de pinza con cinco dedos sobre cilindros de variado tamaño. En el caso de indicadores normalizados, estos rangos cubren muy poco intervalo de los rangos matemáticos teóricos. Se ha puesto con ello de manifiesto la conveniencia de emprender un experimento más exhaustivo para abarcar toda la tipología de agarres que puede realizar la mano para determinar rangos más realista de variación de los indicadores con los que normalizar los indicadores para poder realizar una comparación entre ellos más coherente.

Se ha calculado asimismo la sensibilidad de estos indicadores a errores (limitados a un 5% del rango de cada articulación) en las posturas de agarre utilizadas como datos de entrada. Se ha visto que los índices de sensibilidad son pequeños, pero que hay que profundizar más en estos resultados si se tiene en cuenta que los rangos de variabilidad reales de los indicadores parece que puedan ser mucho más limitados que el considerado matemáticamente.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la Fundació Caixa-Castelló y la Universitat Jaume I, a través del proyecto P1-1B2011-25, y del Ministerio de Ciencia e Innovación y de FEDER, a través del proyecto DPI2010-18177, en los cuales se enmarca esta investigación.

6. REFERENCIAS

- [1] B. E. León, J. L. Sancho-Bru, N. Jarque-Bou, A. Morales, and M. Roa Garzón, "Evaluation of Human Prehension Using Grasp Quality Measures," 2012.
- [2] M. A. Roa and R. Suarez, "Computation of Independent Contact Regions for Grasping 3-D Objects," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 4, pp. 839–850, Aug. 2009.
- [3] I. Kao, K. Lynch, and J. Burdick, "Contact Modeling and Manipulation," *Springer Handbook of Robotics*, pp. 647–668, Sep. 2008.
- [4] A. Bicchi, "On the Closure Properties of Robotic Grasping," *International Journal of Robotics Research*, vol. 14, pp. 319–334, 1995.
- [5] V.-D. Nguyen, *Constructing force-closure grasps*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.
- [6] B. Mishra, J. T. Schwartz, and M. Sharir, "On the existence and synthesis of multifinger positive grips," *Algorithmica*, vol. 2, no. 1–4, pp. 541–558, Nov. 1987.
- [7] C. Ferrari and J. Canny, "Planning optimal grasps," *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2290–2295, 1992.
- [8] R. Suárez, M. Roa, and J. Cornella, "Grasp quality measures," Technical University of Catalonia, 2006.
- [9] Z. Li and S. S. Sastry, "Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 1, pp. 32–44, Feb. 1987.
- [10] B.-H. Kim, S.-R. Oh, B.-J. Yi, and I. H. Suh, "Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2001, vol. 2, pp. 949–956.
- [11] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J.-D. Boissonnat, and J.-P. Merlet, "On Computing Four-Finger Equilibrium and Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 16, no. 1, pp. 11–35, 1997.
- [12] D. Ding, Y.-H. Lee, and S. Wang, "Computation of 3-D form-closure grasps," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 515–522, Aug. 2001.
- [13] B. Mirtich and J. Canny, "Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D," in *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994, pp. 739–747.
- [14] T. Supuk, T. Kodek, and T. Bajd, "Estimation of hand preshaping during human grasping," *Medical engineering & physics*, vol. 27, no. 9, pp. 790–7, Nov. 2005.
- [15] A. T. Miller and P. K. Allen, "Examples of 3D grasp quality computations," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, vol. 2, pp. 1240–1246.
- [16] R. M. Murray, S. S. Sastry, and L. Zexiang, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 1994.
- [17] A. Liegeois, "Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 7, no. 12, pp. 842–868, 1977.
- [18] J. Sancho-Bru, "Modelo biomecànic de la mà orientat al disseny d'eines manuals," Ph. D. thesis, Universitat Jaume I, 2000.
- [19] P. W. Brand and A. Hollister, *Clinical mechanics of the hand*, Third ed. St. Louis: Elsevier Science Health Science div., 1992.
- [20] R. Diankov, "Automated Construction of Robotic Manipulation Programs," Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.
- [21] *VICON Bonita System*. VICON Motion Systems Inc.