

Teleoperación de manos antropomorfas

Raúl Suárez, Jan Rosell y Luca Colasanto

Abstract— Un escenario ideal para la teleoperación de manos antropomorfas es que el operador humano pueda realizar una determinada operación con sus propias manos y el sistema robótico teleoperado provisto de una mano antropomorfa la replique. Actualmente ya existen manos mecánicas antropomorfas con numerosos grados de libertad y la posibilidad de dirigir sus acciones de forma remota es viable, pero, sin embargo, la imposibilidad de que la cinemática de la mano robótica sea totalmente equivalente a la de cualquier humano genera un problema significativo en el esquema de teleoperación mencionado. La respuesta a cómo se deben reproducir los movimientos de la mano humana en la mano robótica para que ésta realice la misma tarea no es lo evidente que en principio pudiera parecer. En este contexto, este artículo presenta dos proyecciones de movimientos de la mano humana a la mano robótica que tienen como fin facilitar las tareas de telemanipulación. Ambas proyecciones han sido implementadas y en el artículo se incluyen ejemplos de resultados experimentales.

I. INTRODUCCIÓN

La teleoperación ha tenido avances significativos en los últimos años, tanto desde el punto de vista de los desarrollos tecnológicos, que permiten comunicaciones y envío de información con mayor velocidad, como desde el punto de vista de desarrollos de algoritmos para procesar la información y realizar el control. Una revisión del estado del arte, de la problemática relacionada y de diferentes aplicaciones de la teleoperación se encuentra en [1]. No obstante, a pesar de estos notables desarrollos en algunas aplicaciones particulares surgen otros problemas asociados, tal es el caso en la teleoperación de manos robóticas antropomorfas que se aborda en este trabajo.

La teleoperación de una mano robótica antropomorfa implica mover sus articulaciones de forma coordinada para realizar una determinada tarea, lo que significa dirigir un número de grados de libertad (GDL) que varía normalmente entre 12 (caso de manos de 4 dedos con 3 GDL independientes cada uno) y 25 (caso de manos con 5 dedos con 4 GDL independientes cada uno más un GDL adicional en la palma de la mano). Esto significa que es muy difícil, sino imposible, para un ser humano generar las consignas trabajando en el espacio articular, y resulta evidente que la manera más intuitiva de generar las consignas es haciendo los gestos deseados con la mano humana, capturando esa información de algún modo y emulando entonces el movimiento de la misma con la mano robótica. Dos problemas propios de este enfoque son:

Los autores desarrollaron el trabajo en el Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona raul.suarez@upc.edu.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Español mediante los proyectos P109/90088, DPI2010-15446 y DPI2008-02448.

- la identificación de las posiciones de la mano humana,
- la correcta emulación de estas posiciones en la mano robótica.

El primero de estos problemas se aborda frecuentemente mediante el uso de un guante provisto de sensores que posibilita la identificación de la configuración cinemática de la mano humana. También hay trabajos que utilizan visión para identificar la pose de la mano, pero esto normalmente requiere la incorporación de marcas especiales sobre la mano y tiene además el inconveniente de que son frecuentes las oclusiones visuales.

El segundo problema no tiene aun una solución general, aun cuando la mano robótica sea antropomorfa las diferencias cinemáticas entre ésta y la mano de cualquier operador humano hacen que la replica exacta de los ángulos de las articulaciones no ponga las yemas de los dedos en las mismas posiciones relativas; por lo tanto si el operario realiza una presión la mano robótica con alta probabilidad fallaría en su realización. Una solución, aunque poco práctica, es que el operario tenga realimentación visual y/o háptica del entorno teleoperado y la use para corregir las posiciones de su mano; pero esto requiere un entrenamiento particular del operario.

En este trabajo se abordan estos problemas, se describe como se ha resuelto el primero de ellos y para el segundo se describen dos posibles proyecciones de posiciones de la mano del operador a la mano robótica, una orientada a la teleoperación de movimientos de la mano en el espacio libre basada en trabajos previos y otra, completamente original, orientada a la ejecución de tareas de presión.

II. ELEMENTOS UTILIZADOS

A. Hardware utilizado

En este trabajo se ha utilizado el siguiente hardware: a) una mano robótica antropomorfa, b) un robot industrial, c) un guante sensorizado. A continuación se describe brevemente cada elemento.

- a) *Mano robótica antropomorfa*. Se ha usado la mano Schunk Anthropomorphic Hand (SAH) [2], mostrada en la Fig. 1, basada en la mano DLR [3]. Tiene tres dedos con cuatro articulaciones cada uno y un pulgar con cinco articulaciones. En todos ellos la articulación distal está mecánicamente acoplada con la articulación media, y por lo tanto hay un total de 17 articulaciones con 13 GDL independientes.
- b) *Guante sensorizado*. Se ha usado el guante sensorizado CyberGlove (Fig. 2). Es un guante provisto de 22 sensores resistivos, incluye 3 sensores de flexión por dedo, cuatro de abducción entre los dedos, uno en la

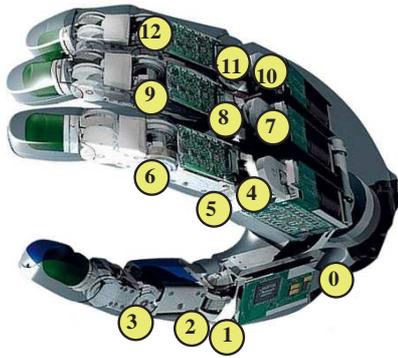


Fig. 1. Mano mecánica antropomorfa SAH (cada número indica un grado de libertad independiente).

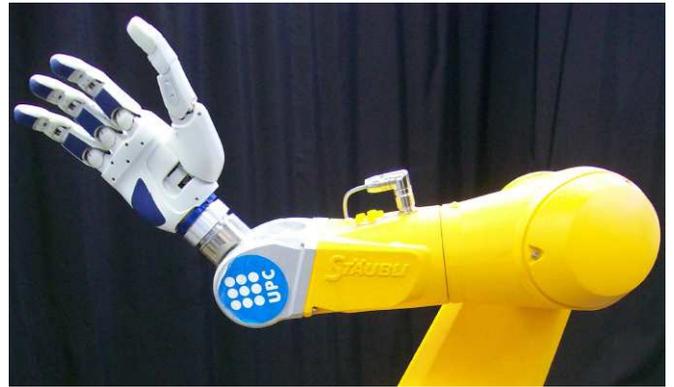


Fig. 3. Robot industrial Stäubli TX 90 con la mano mecánica SAH.

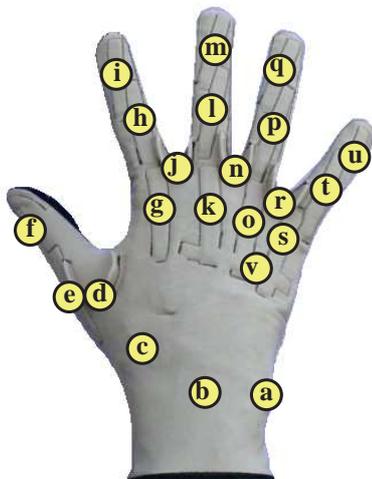


Fig. 2. Guante sensorizado (cada letra indica un sensor).

palma, y dos para medir la flexión y abducción de la muñeca.

- c) *Robot Industrial.* La mano está montada en un robot industrial de uso general de 6 GDL Stäubli TX 90 (Fig. 3) equipado con un controlador CS8.

El esquema del set-up experimental formado por estos elementos se ilustra en la Figura 5, que incluye el tipo de conexiones entre los diferentes elementos.

B. Software utilizado

Se ha implementado una herramienta de software para la interconexión con todos los dispositivos, que sigue el esquema de la Figura 6. Se puede observar que consta de tres módulos independientes dedicados a las comunicaciones, a la simulación y a la interacción con los dispositivos, incluyendo cada uno de ellos su propia interfaz gráfica [4]. El módulo de comunicación permite la comunicación entre los dispositivos de entrada (guante sensorizado y dispositivo de seguimiento) y de salida (el robot y la mano mecánica). El módulo de simulación permite emular los dispositivos de salida y ver gráficamente sus movimientos. El módulo de interacción permite al usuario la gestión de los dispositivos

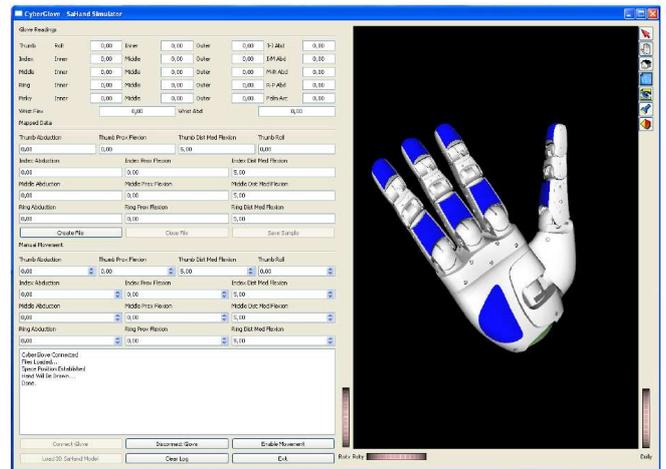


Fig. 4. Simulador de la mano mecánica SAH.

(inicialización, test, conexión remota mediante el módulo de comunicaciones y supervisión y paradas de emergencia). La implementación se ha llevado a cabo en C++ usando librerías multiplataforma de código abierto como Qt para la interfase gráfica y Coin3D para la parte gráfica.

III. DETERMINACIÓN DE POSICIONES DE LA MANO ROBÓTICA A PARTIR DE LAS POSICIONES DE LA MANO HUMANA

La proyección de la información obtenida sobre la configuración de la mano humana a la mano robótica se puede realizar de las siguientes maneras [5]:

- *Proyección articulación-articulación.* Cada articulación del guante sensorizado se asocia directamente a una articulación de la mano robótica. La principal ventaja es la simplicidad, y la desventaja es que siempre habrá diferencias entre las posiciones relativas de los extremos de los dedos entre ambas manos, fundamentalmente debidas a las diferencias cinemáticas entre ambas manos.
- *Proyección de la pose de la mano.* Unas determinadas poses de la mano humana se asocian con unas determinadas poses predefinidas de la mano mecánica. La principal ventaja es que las poses de la mano robótica

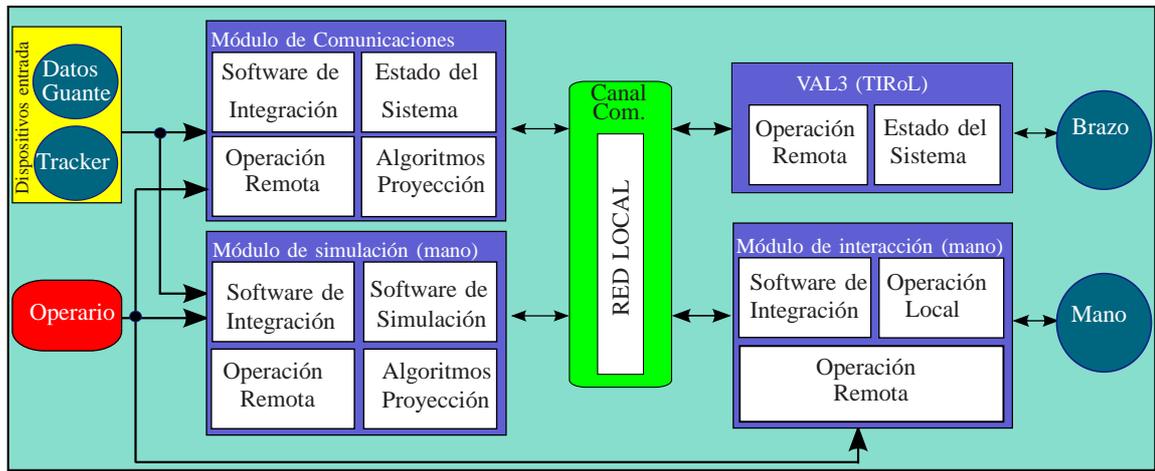


Fig. 6. Esquema del software implementado.

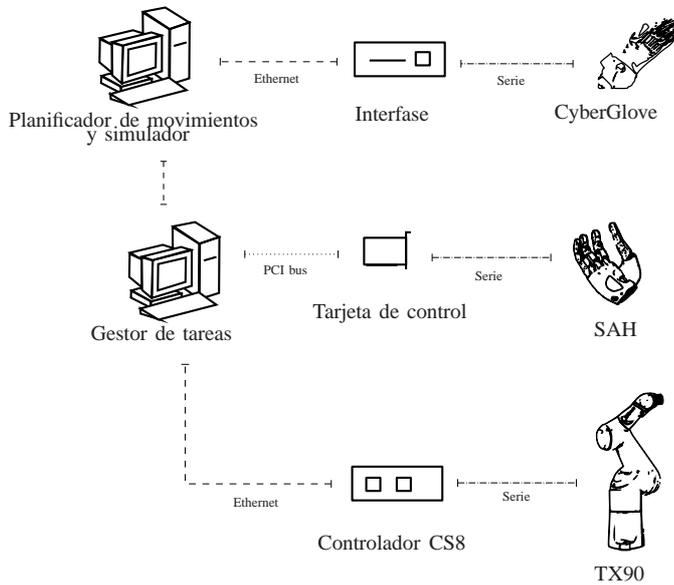


Fig. 5. Esquema del set-up experimental.

pueden ser preprogramadas, y la desventaja es que la pose de la mano humana debe ser correctamente identificada y asociada con las poses equivalentes de la mano robótica.

- *Proyección punto a punto.* Las posiciones de determinados puntos en los extremos de los dedos de la mano del operador son replicadas por determinados puntos de los dedos de la mano mecánica. La principal ventaja es que las posiciones relativas entre los extremos de los dedos se mantienen con mayor precisión, y la desventaja es que es necesario resolver la cinemática inversa de la mano robótica, tarea que requiere cierto tiempo de cómputo.

En este trabajo se abordan los dos primeros métodos, y se plantea su fusión para realizar una telemanipulación asistida. Esto permite realizar prensiones de precisión y de

TABLA I
CORRESPONDENCIA ENTRE LAS ARTICULACIONES DE LA MANO SAH (FIG. 1) Y LOS SENSORES DEL CYBERGLOVE (FIG. 2) USADOS.

Sensores del Cyberglove		Articulaciones de SAH	
Id.	Nombre	Id.	Nombre
c	giro del pulgar S_B^T	0	base del pulgar
c	giro del pulgar S_B^T	1	abducción del pulgar
e	medio del pulgar S_D^T	2	proximal del pulgar
f	distal del pulgar S_D^T	3	media del pulgar
j	abducción índice-medio S_A^{IM}	4	abducción del índice
g	proximal del índice S_P^I	5	proximal del índice
h	medio del índice S_M^I	6	media del índice
-	-	7	abducción del medio
k	proximal del medio S_P^M	8	proximal del medio
l	medio del medio S_M^M	9	media del medio
n	abducción medio-anular S_A^{MR}	10	abducción del anular
o	proximal del anular S_P^R	11	proximal del anular
p	medio del anular S_M^R	12	media del anular

fuerza (en inglés denominados *precision* y *power grasps* respectivamente) [6], [7] de una manera bastante intuitiva.

La proyección articulación-articulación fue desarrollada teniendo en cuenta las diferencias entre las configuraciones de la mano humana medidas con el guante sensorizado y las posibles configuraciones de la mano robótica (Sección II-A). Esta proyección permite realizar prensiones de fuerza con cierta facilidad, pero puede ser muy complicado realizar prensiones de precisión.

La proyección de la pose de la mano fue desarrollada usando lógica difusa para identificar la pose del operador humano, que luego es reproducida por un movimiento pre-determinado de la mano robótica. Esta proyección permite realizar prensiones de precisión siguiendo los movimientos de la mano humana.

En las secciones siguientes se detallan las dos proyecciones mencionadas.

IV. PROYECCIÓN ARTICULACIÓN-ARTICULACIÓN

La mano antropomórfica SAH [2], mostrada en la Figura 1, tiene cuatro dedos idénticos con cuatro articulaciones cada

uno, de las cuales la distal y la media estan acopladas mecánicamente, por lo que cada dedo tiene tres grados de libertad. Adicionalmente el dedo que actúa de pulgar tiene un grado de libertad más, por lo que en total la mano tiene 13 GDL.

Para la proyección entre los sensores del guante y las articulaciones de la mano mecánica SAH hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones (ver Figuras 2 y 1:

- La palma de la mano SAH es rígida, por lo que se ignoran los sensores b y a de flexión y abducción de la muñeca y el sensor v del arco de la palma.
- La mano SAH no tiene dedo meñique, por lo que se descartan los sensores u , t , s y r .
- La mano SAH tiene acopladas las articulaciones distal y media de cada dedo, por lo que los sensores i , m y q no se usan.
- En el guante la abducción se mide de forma relativa, es decir que los sensores j y n dan, respectivamente, el ángulo relativo entre el dedo índice y el medio y entre el dedo medio y el anular. Teniendo en cuenta esto, se escoge fijar el valor de la abducción del dedo medio a cero (articulación 7), y se hace una correspondencia directa entre los sensores j y n y las articulaciones 4 y 10, respectivamente.
- De la experimentación ha resultado que la articulación 1 se movía de forma más natural si se asociaba al sensor c en vez del d , por lo que el sensor c se corresponde con dos articulaciones, la 0 y la 1.

De estas consideraciones resulta que solo 11 de los 22 sensores de la mano se usan en la correspondencia con las articulaciones de la mano SAH. El mapa completo de la correspondencia se muestra en la Tabla I. Nótese que esta correspondencia hace que la mano SAH se controle con 11 GDL aunque tenga 13.

V. PROYECCIÓN DE LA POSE DE LA MANO

A. Selección de las poses

Existen varias clasificaciones de las poses utilizadas por el ser humano para sujetar objetos, siguiendo diferentes criterios, como el tipo de tarea a realizar (por ejemplo: de fuerza o de precisión), el tipo de objeto a sujetar (por ejemplo: forma, tamaño, fricción), o las características de la mano (por ejemplo: la fuerza máxima que puede generar) [8] [6] [7].

Para implementar esta proyección se han seleccionado nueve tipos de presión de precisión, según la clasificación dada por Cutkosky [7], seis de tipo prismático y tres de tipo circular. En configuraciones de tipo prismático las yemas de los dedos están alineadas definiendo un segmento (con el pulgar oponiéndose al resto de los dedos), mientras que en las de tipo circular todas las yemas de los dedos se sitúan aproximadamente sobre una circunferencia. Los nueve tipos de presión escogidos son los siguientes, según se ilustran en la Figura 7:

G_{TTe} : presión prismática con el pulgar y dedo índice, extendidos.

G_{TIMe} : presión prismática con el pulgar y dedos índice y medio, extendidos.

G_{TIMRe} : presión prismática con el pulgar y dedos índice, medio y anular, extendidos.

G_{TIf} : presión prismática con el pulgar y dedo índice, flexionados.

G_{TIMf} : presión prismática con el pulgar y dedos índice y medio, flexionados.

G_{TIMRf} : presión prismática con el pulgar y dedos índice, medio y anular, flexionados.

$G_{tripode}$: presión circular con el pulgar y dedos índice y medio.

G_{disco} : presión circular con el pulgar y dedos índice, medio y anular, extendidos.

G_{esfera} : presión circular con el pulgar y dedos índice, medio y anular, flexionados.

B. Identificación de las poses

Uno de los principales problemas en la identificación del tipo de pose es la variabilidad de configuraciones que se pueden producir dentro de cada tipo, tanto por las particularidades de cada operario como por las variaciones entre una ejecución y otra de la misma tarea. Existen trabajos previos enfocando el problema mediante redes neuronales [9], aquí se ha buscado un nuevo enfoque basado en lógica difusa [10].

La identificación de la pose de la mano se lleva a cabo utilizando las siguientes variables,

- V_R^T : rotación del pulgar con respecto a la palma;
- V_A^{IM} : ángulo de abducción entre los dedos índice y medio;
- V_A^{MR} : ángulo de abducción entre los dedos medio y anular;
- V_F^T : flexión del pulgar;
- V_F^I : flexión del dedo índice;
- V_F^M : flexión del dedo medio;
- V_F^R : flexión del dedo anular.

que se calculan a partir de la información obtenida del guante sensorizado como:

$$V_R^T = \text{norm}(s_B^T) \quad (1)$$

$$V_A^* = \text{norm}(s_A^*) \quad (2)$$

$$V_F^* = \text{Sat}(a_1 \text{norm}(s_D^*) + a_2 \text{norm}(s_M^*) + a_3 e^{-20(1-\text{norm}(s_F^*))}) \quad (3)$$

donde $\text{norm}(x)$ indica la normalización del rango real de x al rango $[0, 1]$, $\text{Sat}(x)$ es la función saturación en el dominio $[0, 1]$, y a_1 , a_2 y a_3 son constantes de peso determinadas empíricamente. Nótese que $V_F^* = 0$ y $V_F^* = 1$ para el dedo totalmente extendido y flexionado respectivamente.

Las variables V_F^* cambian significativamente de un tipo de presión a otro y poco dentro del mismo tipo, por eso son usadas para su identificación. Las siete variables V_*^* se toman como entradas de un sistema de lógica difusa que determina el grado de pertenencia de una determinada pose a uno de los tipos de pose seleccionados.

Las variables V_R^T se procesan en la entrada del sistema de lógica difusa mediante dos funciones de pertenencia

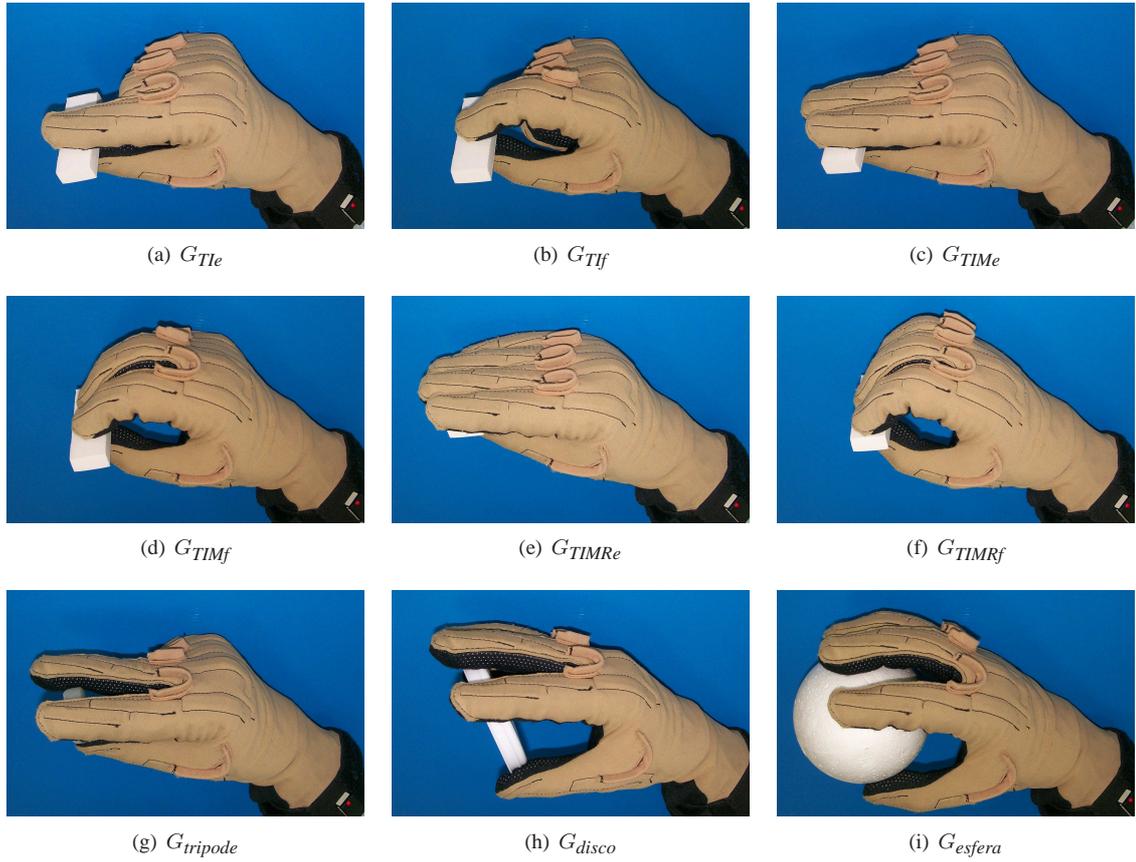


Fig. 7. Ilustración de los nueve tipos de presión seleccionados G_* .

(A=valor alto; B=valor bajo) mientras que las demás variables se procesan con tres funciones de pertenencia (A=valor alto; B=valor medio, C=valor bajo).

El sistema de lógica difusa (FLC) se implementó siguiendo el método de Mamdani con 12 reglas de tipo:

IF ($V_1 = X_1$) and ($V_2 = X_2$) and... ($V_i = X_i$) and...
THEN return(G) (4)

donde:

- V_i es una variable de entrada, i.e. $V_i = v_*^*$.
- X_i es una de las correspondientes funciones de pertenencia, i.e. $X_i \in \{A, B, C\}$ en el caso general en que $v_*^* \neq v_R^T$ o $X_i \in \{A, B\}$ para v_R^T .
- G es el identificador de los nueve tipos de presión seleccionados (Apartado V-A).

La Figura 8 muestra las reglas implementadas para cada tipo de presión; los antecedentes se calculan con el operador mínimo y el consecuente con el método de implicación mínima. Cuando se produce la misma salida en dos reglas diferentes se aplica el método de máxima agregación.

La salida del FLC es un vector α , con 9 elementos que indican respectivamente el nivel de pertenencia de una configuración de la mano dada a cada uno de los tipos de

regla	V_R^T	V_F^T	V_F^I	V_F^M	V_F^R	V_A^{IM}	V_A^{MR}	"THEN"
1	B	A	A	C	C	-	-	G_{Tle}
2	B	B	B	C	C	-	-	G_{Tlf}
3	B	A	A	A	C	C	-	G_{TIMe}
4	B	B	B	B	C	B	-	G_{TIMf}
5	B	A	A	A	A	C	C	G_{TIMRe}
6	B	B	B	B	B	B	B	G_{TIMRf}
7	B	B	B	B	B	C	C	G_{TIMRf}
8	B	A	A	A	C	A	-	$G_{tripode}$
9	B	A	A	A	C	B	-	$G_{tripode}$
10	B	B	B	B	B	A	A	G_{esfera}
11	B	A	A	A	A	A	A	G_{disco}
12	B	A	A	A	A	B	B	G_{disco}

Fig. 8. Reglas implementadas en el sistema FLC. Hay una regla para cada tipo de presión prismática (reglas 1 a 6), con excepción de la TIMR que necesita otra regla más (regla 7) para incluir un tango de abducción mayor. Por lo que se refiere a las presiones circulares, debido al mayor rango de abducción usado, hay dos reglas para las presiones Trípedo (reglas 8 y 9) y 2 para las presiones Disco (reglas 11 y 12), mientras que para la presión Esfera es suficiente con una sola regla (regla 10).

presión G_* considerados, es decir:

$$\alpha = (\alpha_{Tlf}, \alpha_{TIMe}, \alpha_{TIMf}, \alpha_{TIMRe}, \alpha_{TIMRf}, \alpha_{TIMRf}, \alpha_{tripode}, \alpha_{esfera}, \alpha_{disco}) \quad (5)$$

Finalmente, a partir del vector α se obtiene un valor entero

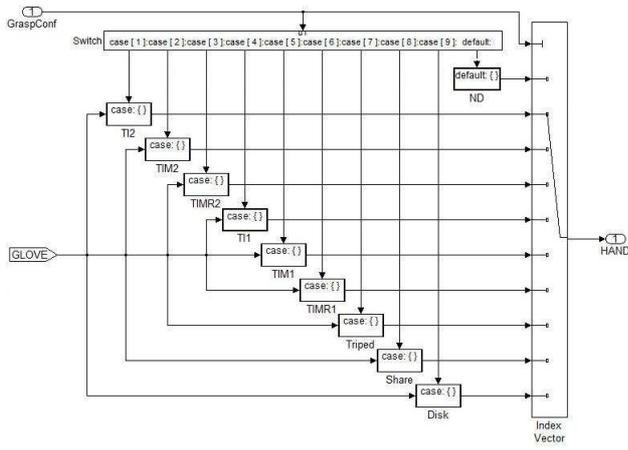


Fig. 9. Esquema de Simulink (Matlab) de cómo se genera la proyección en función de los valores de GraspConf y de los sensores del guante, cada caso corresponde a un tipo de prensión.

$GraspConf \in \{0, 1, \dots, 9\}$ que indica el resultado de la identificación del tipo de prensión, $GraspConf = 0$ indica que no hubo una identificación adecuada y $GraspConf = 1, \dots, 9$ indica el tipo de prensión identificada de acuerdo a un orden preestablecido.

C. Proyección de la pose identificada

Para cada una de las nueve poses seleccionadas se determina una proyección particular, que se ajusta a la posición específica de la mano humana indicada por los sensores S^* del guante sensorizado. La Figura 9 representa el sistema de decisión: en función de la variable GraspConf se activa una u otra proyección que a su vez depende de los valores de los sensores del guante.

Cuando se realiza una prensión de precisión, con frecuencia las articulaciones distales y medias de los dedos no cambian significativamente, mientras que si lo hace la articulación proximal, además la distancia entre las yemas del pulgar y de los demás dedos es más sensible a las variaciones de la articulación proximal. Así, algunos tipos de prensión se pueden aproximar con un único GDL basado en la articulación proximal, y esta idea es la utilizada para generar las proyecciones de una forma relativamente sencilla.

Para cada tipo de prensión se fijan dos vectores L_{min} y L_{max} de dimensión 1×13 , representando respectivamente los valores de las articulaciones para las poses de la mano de máxima y mínima apertura es este tipo de prensión, es decir, se representan dos configuraciones de la mano que hacen que la distancia entre las yemas del pulgar y los demás dedos sea máxima o nula, respectivamente. Las posiciones intermedias de la mano para cada tipo de prensión se obtienen como interpolación de estas dos configuraciones extremas; esto asegura movimientos de los dedos libres de autocolisión. Siguiendo este razonamiento, el procedimiento para generar la proyección de una presión tipo G_{TIMRe} es el siguiente:

- 1) $I = \text{norm}(S_P^I)$;
- 2) $M = \text{norm}(S_P^M)$;
- 3) $R = \text{norm}(S_P^R)$;



Fig. 10. Teleoperación mediante la correspondencia articulación a articulación descrita en la Sección IV, usando el módulo de simulación de la mano (fila superior) y usando la mano real (fila inferior).

- 4) $k = 1 - \text{promedio}(I, M, R)$;
- 5) $\text{pose} = k(L_{max} - L_{min}) + L_{min}$;
- 6) SAH(hand) = pose (ejecución de la pose en la mano SAH);

En casos de prensiones donde no se utilice el dedo anular o el dedo anular y el medio, simplemente se eliminan los pasos 3, ó 3 y 2 respectivamente.

VI. EXPERIMENTACIÓN

A. Ejemplo 1: Teleoperación mediante proyección articulación-articulación

En la Figura 10 se muestra el uso del método de correspondencia articulación a articulación, tanto usando el módulo de simulación de la mano como la mano real. Puede observarse que las posturas de la mano mecánica SAH reproducen bien las de la mano humana captadas mediante el guante sensorizado. Esta correspondencia ha sido usada con éxito para proyectar los movimientos coordinados de la mano humana a la mano mecánica SAH. Se han realizado movimientos libres con el guante y las configuraciones muestreadas se han proyectado a la mano mecánica SAH, y con todas las configuraciones libres de colisión obtenidas se ha aplicado un análisis de componentes principales obteniéndose lo que se ha denominado Direcciones Principales de Movimiento (PMDs), que han permitido la planificación eficiente y con apariencia antropomorfa de movimientos para conjuntos robóticos brazo-mano [11][12].

B. Ejemplo 2: Teleoperación mediante proyección de la pose de la mano

En la Figura 11 se muestra el uso del método de correspondencia mediante poses. La captura de las poses de la mano humana permite su reproducción en la mano mecánica con el objetivo de realizar tareas de prensión de objetos, tal como se muestra en los experimentos de validación mostrados en la Figura 12.



Fig. 12. Experimentos de validación

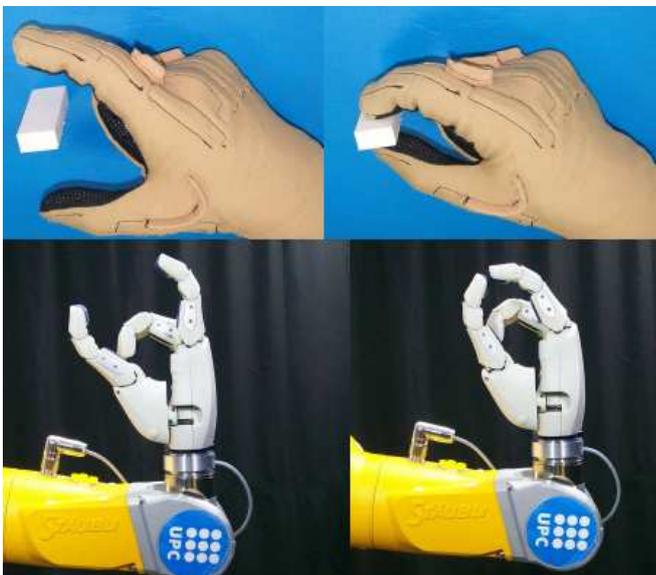


Fig. 11. Teleoperación mediante proyección de poses (Sección V).

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha tratado el problema de proyección de movimientos de la mano humana a una mano mecánica antropomorfa de cara a su teleoperación, problema que, además de la complejidad propia de un sistema teleoperado (por ejemplo: envío de información, realimentación, estabilidad, entre otros temas) tiene el problema de que la cinemática de una mano robótica no coincide con la del operario y por tanto no es evidente la ejecución de movimientos del sistema robótico siguiendo instrucciones o copiando los movimiento que realiza el operario. Se han descrito dos enfoques diferentes, uno siguiendo la línea de una proyección articulación-articulación, es una versión mejorada de trabajos previos que puede ser muy útil en tareas donde los gestos sean muy importantes sin requisitos muy exigentes en cuanto a prensión de objetos o posicionamiento preciso de la mano; y un segundo enfoque, completamente original, basado en una

proyección de la pose de la mano que por el contrario está especialmente orientado a tareas de prensión, ya que proyecta el tipo de prensión y los movimientos básicos a realizar con independencia de la posiciones precisas de la mano del operario humano. Ambos enfoques han sido implementados y ambos son de utilidad dependiendo de las circunstancias en que se deba realizar la teleoperación, por esta razón el trabajo actualmente en curso se centra en la fusión de estas proyecciones a fin de sacarles el mayor provecho posible y lograr una mayor facilidad para el operario al realizar la teleoperación de manos robóticas antropomorfas.

REFERENCIAS

- [1] L. Basañez and R. Suárez, "Teleoperation," in *Springer Handbook of Automation*, S. Nof, Ed. Springer, 2009, pp. 449–468.
- [2] Schunk GmbH & Co. KG, "Schunk anthropomorphic hand," <http://www.schunk.com/>, May 2006.
- [3] J. Butterfass, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, and G. Hirzinger, "Design and experiences with DLR hand II," in *Proc. of the World Automation Congress*, vol. 15, 2004, pp. 105–110.
- [4] J. Fortín and R. Suárez, "General environment for human interaction with a robot hand-arm system and associate elements," in *IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, EFTA*, 2010, pp. 34–39.
- [5] A. Peer, S. Einkenkel, and M. Buss, "Multi-fingered telemanipulation - mapping of a human hand to a three finger gripper," in *Proc. of the 17th IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication*, 2008, pp. 465–470.
- [6] J. Napier, "The prehensile movements of the human hand," *Journal of Bone & Joint Surgery*, vol. 48B(4), pp. 902–913, 1956.
- [7] M. R. Cutkosky, "On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 269–279, 1989.
- [8] C. L. Taylor and R. J. Schwarz, "The anatomy and mechanics of the human hand," *Artificial Limbs*, vol. 2(2), pp. 22–35, 1955.
- [9] T. Wojtara and K. Nonami, "Hand posture detection by neural network and grasp mapping for a master slave hand system," in *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2004, pp. 866–871.
- [10] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8(3), pp. 338–353, 1965.
- [11] J. Rosell, R. Suárez, C. Rosales, J. A. García, and A. Pérez, "Motion planning for high DOF anthropomorphic hands," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2009, pp. 4025–4030.
- [12] J. Rosell, R. Suárez, C. Rosales, and A. Pérez, "Autonomous motion planning of a hand-arm robotic system based on captured human-like hand postures," *Autonomous Robots*, vol. 31, no. 1, pp. 87–102, 2011.