

ANÁLISIS Y DISEÑO MECÁNICO DE UNA INTERFAZ HÁPTICA PARA TAREAS DE MANIPULACIÓN

Javier López^{1*}, Ignacio Galiana^{2*}, José Luis Torres^{1†}, Manuel Ferre^{2†}, Antonio Giménez^{1††}

1-Área de Ingeniería Mecánica. Universidad de Almería, España, email: {javier.lopez, †jltmoreno, ††agimfer}@ual.es

2- Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC). Universidad Politécnica de Madrid, España, email: {ignacio.galiana, †m.ferre}@upm.es

Palabras clave: Haptics, Interfaz multidedo, Manipulación bimanual.

Resumen

Para el desarrollo de tareas como exploración o manipulación precisa de objetos simulados en entornos virtuales o de objetos remotos mediante teleoperación, no es suficiente con realimentar información visual sino que se requiere de dispositivos capaces de proporcionar realimentación de tipo táctil y de fuerza al usuario. Las interfaces hápticas permiten realizar este tipo de interacción, incrementando el rendimiento de la tarea y la sensación de inmersión del usuario.

La interfaz háptica MasterFinger permite llevar a cabo tareas de manipulación bimanual. En este trabajo se presenta la síntesis y análisis de su estructura mecánica, que permite al usuario realizar tareas de manipulación con objetos virtuales dentro del espacio de trabajo. Los requisitos de diseño fueron: definir un módulo básico que permita al usuario explorar objetos con un dedo, cuyo mecanismo fuera sencillo, compacto y escalable; partiendo de este diseño se puede escalar fácilmente para su uso en tareas de manipulación avanzada en las que se requiere de varios dedos. La ubicación de los actuadores y las longitudes de los eslabones que forman el mecanismo se han optimizado en base a los parámetros que van a caracterizar las prestaciones de la interfaz (manipulabilidad, fuerza reflejada, inercia, rigidez, etc.). Así, se ha obtenido el mapa de las fuerzas que el dispositivo es capaz de reflejar y otras gráficas que dan información de la manipulabilidad (número de condición de la matriz jacobiana y elipsoides de manipulabilidad) en los distintos puntos del espacio de trabajo.

El dispositivo MasterFinger está basado en un diseño modular, en el que cada dedo dispone de su propia estructura mecánica y controlador electrónico. Cada módulo es un mecanismo serie-paralelo en el que la posición de los actuadores y las longitudes de los eslabones se han obtenido maximizando los índices de desempeño de la interfaz.

1. Introducción

Las interfaces hápticas son dispositivos mecánicos que permiten al usuario interactuar con entornos virtuales o remotos, donde la comunicación entre el hombre y dicho entorno es bidireccional. Por un lado el dispositivo debe ser capaz de leer la posición y fuerza ejercida por el usuario, y por otro lado debe proporcionar al usuario las fuerzas generadas en el entorno virtual o remoto.

En los últimos años las interfaces hápticas han experimentando notables desarrollos, siendo incluso comercializadas algunas de ellas [1]. Principal motivo de este desarrollo ha sido la gran cantidad de aplicaciones: telerrobótica, cirugía médica, rehabilitación médica, educación, y videojuegos entre otras. Como es lógico, debido a la gran variedad de aplicaciones, cada interfaz háptica será sólo adecuada para un cierto tipo de aplicación. El diseño mecánico de cada dispositivo vendrá condicionado por los requisitos de diseño derivados de la aplicación específica a la que se destine. Así, el diseño vendrá caracterizado por, entre otras especificaciones, el espacio de trabajo, capacidad de carga, manipulabilidad, inercia y rigidez. El diseño de una interfaz háptica deberá estar orientado a conseguir la mayor transparencia de la misma, entendiendo por transparencia la situación o circunstancia que se da cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse físicamente en el entorno virtual o remoto. También expresa la capacidad del sistema para seguir el movimiento del usuario rápidamente y sin oposición. Es decir, el usuario no debe percibir ninguna fuerza sobre la mano en tanto que no exista interacción física con el entorno virtual. Un parámetro indicativo de la transparencia de la interfaz es la manipulabilidad de la misma. Esta manipulabilidad suele estimarse mediante el *índice de condición local*, LCI (*local conditioning index*), y los elipsoides de manipulabilidad.

Otro factor importante que va a incrementar la sensación de inmersión del usuario en el entorno virtual es el número de dedos que se utilizan. Cuanto mayor sea el número de dedos utilizados para explorar el entorno virtual, mayor será la sensación de naturalidad y realismo. Además, será mayor el número de tareas que se pueden realizar. La interacción con un solo dedo en el entorno virtual, sólo permite desarrollar tareas de exploración y palpación, se requiere de dos o más dedos para realizar tareas más avanzadas como el agarre o manipulación de objetos.

En este trabajo se presenta el proceso de diseño de la configuración cinemática de la interfaz háptica MasterFinger [2][3]. En primer lugar se plantean los requisitos de diseño del dispositivo, en base a los cuales se desarrolla el diseño conceptual del mismo. Una vez se ha resuelto la cinemática del mecanismo, se realiza la optimización del mecanismo en base a criterios de manipulabilidad y capacidad de carga. Finalmente se muestran distintos mapas de desempeño del mecanismo optimizado y se exponen las conclusiones más importantes del trabajo.

2. Requisitos de diseño

El diseño mecánico de las interfaces hápticas debe ir orientado a conseguir: amplio espacio de trabajo, reducida inercia, elevada rigidez, nulo (o muy poco) backlash, baja

fricción, elevado rango de fuerzas, y la ausencia de puntos singulares dentro del espacio de trabajo. Fisher et al. [4] expone una excelente discusión de los requisitos que deben cumplir los dispositivos empleados en teleoperación, agrupando estos requisitos según tres categorías: diseño, funcionalidad y adecuación al uso.

En base a los objetivos anteriores, el diseño de este tipo de dispositivos no es una tarea trivial, debido principalmente a que algunos de los requisitos son contrapuestos. Así por ejemplo, un mayor espacio de trabajo implica una mayor inercia del dispositivo al mismo tiempo que disminuye la rigidez. Las necesidades específicas de estos dispositivos han conducido a una especialización y diferenciación con respecto al diseño mecánico de los robots manipuladores. La configuración mecánica en serie de los manipuladores actuales permite alcanzar un amplio espacio de trabajo, pero presentan elevada inercia debido a que los actuadores están ubicados en las articulaciones. Dicha inercia puede ser reducida situando los actuadores próximos a la base, pero el uso de sistemas de transmisión auxiliares incrementa la flexibilidad del mecanismo. Como alternativa a este problema, la mayoría de las interfaces hápticas utilizan mecanismos con configuración en paralelo o en serie-paralelo [5]. Esta configuración permite alojar los actuadores en la base (o muy próximos a esta) reduciendo la inercia del mecanismo, y dotar al dispositivo de elevada rigidez estructural.

En adición a los requisitos de diseño descritos anteriormente, la interfaz háptica que se presenta en este trabajo deberá utilizarse para tareas de manipulación avanzadas, en las que es necesario el empleo de dos ó más dedos por cada mano. De esta manera, se establece como necesidad el diseño de un dispositivo fácilmente escalable, en el que partiendo de un módulo básico (para un solo dedo) se puedan obtener configuraciones para dos o más dedos. Atendiendo a esta escalabilidad, el módulo básico deberá ser lo más compacto y sencillo posible.

El espacio de trabajo requerido para esta interfaz háptica será el abarcado por los movimientos de la mano y el antebrazo del usuario pivotando sobre la muñeca y el codo respectivamente. Estos movimientos corresponden a tareas de manipulación en el que el usuario tiene apoyados los codos sobre una superficie de trabajo. Por otro lado, el diseño también está condicionado por el tipo de agarre y la forma y tamaño del objeto que se pretende manipular [6]; en este caso se llevarán a cabo tareas en las que se realicen agarres de precisión de objetos de hasta 2 N de peso.

En el siguiente apartado se describen con más detalle estas consideraciones de diseño y se expone el diseño conceptual original de la interfaz háptica desarrollada.

3. Diseño conceptual

La idea principal del dispositivo es que sea fácilmente escalable, para ello se ha buscado un módulo básico con una estructura sencilla y compacta, de forma que se puedan componer varios de estos módulos sin que los volúmenes ocupados por cada uno de ellos interfieran entre sí.

Con un mecanismo exclusivamente paralelo es posible conseguir seis grados de libertad, su ventaja es que todos los actuadores esta situados fijos a una base común, por lo

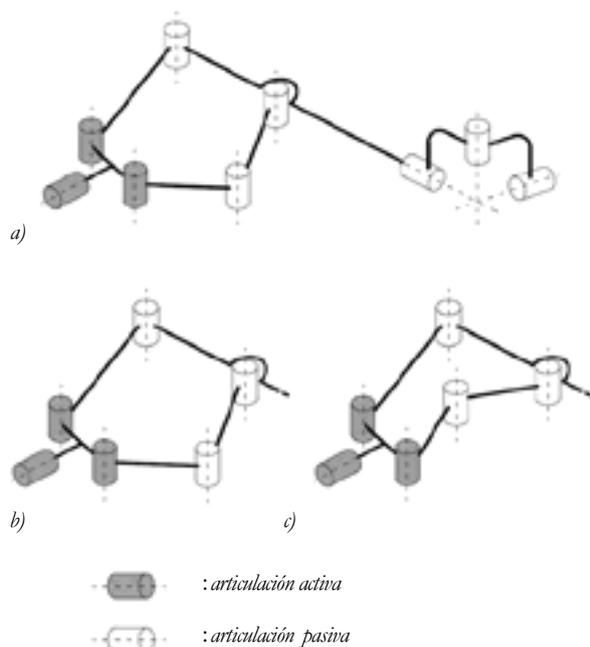


Figura 1: a) Estructura cinemática del MasterFinger. b) Configuración 'codo fuera' del mecanismo cinco barras. c) configuración 'codo dentro'.

que la inercia del mecanismo es muy pequeña y además se consigue una gran rigidez; el problema de esta configuración es el elevado volumen que ocupa el mecanismo en comparación con el menor espacio de trabajo alcanzado por su efector final, lo cual hace difícil su escalabilidad. Se ha optado por una configuración serie-paralelo en la que los actuadores se sitúan cerca de la base del dispositivo. El mecanismo paralelo confiere gran rigidez en su plano contenido, mientras que para la dirección perpendicular a dicho plano es necesario incrementar el momento de inercia de la sección resistente de los eslabones.

La figura 1 muestra la estructura cinemática de la interfaz háptica MasterFinger, con 6 g.d.l. permite posicionar y orientar el dedo en cualquier lugar y dirección dentro de su espacio de trabajo. La estructura paralelo es un mecanismo cinco barras con dos grados de libertad. Este mecanismo permite dos configuraciones, una 'codo fuera' y otra 'codo dentro'. Como se mostrará en la Sección 5, los índices de rendimiento para la configuración 'codo fuera' resultan ser muy superiores a los obtenidos para la configuración 'codo dentro'.

Cada módulo es utilizado por un sólo dedo del usuario, sobre el que, para llevar a cabo convenientemente las tareas de agarre de precisión previstas, se deben poder reflejar fuerzas en cualquier dirección del espacio, no siendo necesaria la reflexión de momentos. Así, los 3 primeros g.d.l. permiten posicionar en el espacio el efector final y, por medio de tres actuadores, reflejar fuerzas en cualquier dirección del espacio. Los 3 últimos g.d.l. (pasivos) permiten orientar el efector final, y gracias a que sus ejes se cortan en un punto, no se verán reflejados momentos sobre el dedo del usuario. El efector final del MasterFinger es un dedal ergonómico diseñado especialmente para permitir la exploración natural de objetos y la adecuada realimentación de fuerzas sobre el dedo del usuario [7]. Respecto al resto de componentes de la interfaz, todos los eslabones se han fabricado en



Figura 2: Modelo 3D-CAD.

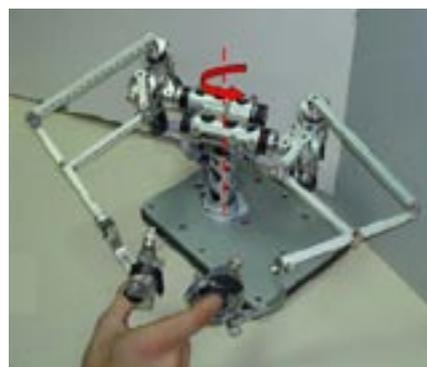


Figura 3: Prototipo del MasterFinger-2. Actuador redundante en la base.

aluminio 7075-T6, articulados entre sí mediante cojinetes de fricción. Las fuerzas reflejas son generadas mediante motores Maxon (RE 25, 10W) y reductores planetarios Maxon GP26. Para las reductoras se ha seleccionado convenientemente una relación de transmisión baja (226/16), de forma que la inercia aparente del dispositivo no sea elevada. La figura 2 muestra un modelo CAD en 3D del módulo básico MasterFinger.

El espacio de trabajo de un módulo permite que la mano del usuario se mueva libremente rotando sobre la muñeca. Componiendo dos de estos módulos se pueden realizar tareas de agarre con dos dedos. En el caso de tareas de manipulación en las que se requieren movimientos del antebrazo rotando sobre el codo, es necesario incrementar el espacio de trabajo abarcado por estos módulos. De acuerdo con los valores recogidos en tablas antropométricas [8] relativas a una persona de altura h , la longitud de su antebrazo es $d=0.146h$. En base a esta medida, y tomando como referencia un sujeto de 175 cm de altura, se ha ubicado un grado de libertad adicional, actuado por un motor fijo a la base. La figura 3 muestra un prototipo del MasterFinger-2, donde todos los actuadores están situados próximos al motor adicional fijo a la base. Una visión del espacio de trabajo alcanzable por cada módulo de la interfaz háptica se representa en la figura 4.

Para realizar tareas de manipulación más avanzadas en las que es necesaria la intervención de dos manos, aplicando el concepto de escalabilidad del MasterFinger se ha desarrollado un dispositivo para tareas de manipulación bimanual, donde se ha hecho uso de dos MasterFinger-2. Dependiendo de la tarea que se vaya a desarrollar, los dos dispositivos hápticos se podrán colocar en su posición original o en posición invertida. Esta segunda alternativa es más apropiada para la mayoría de las tareas de manipulación, en las que el objeto es manipulado sobre una superficie de trabajo. La configuración invertida permite dejar libre toda la superficie de la mesa de trabajo,

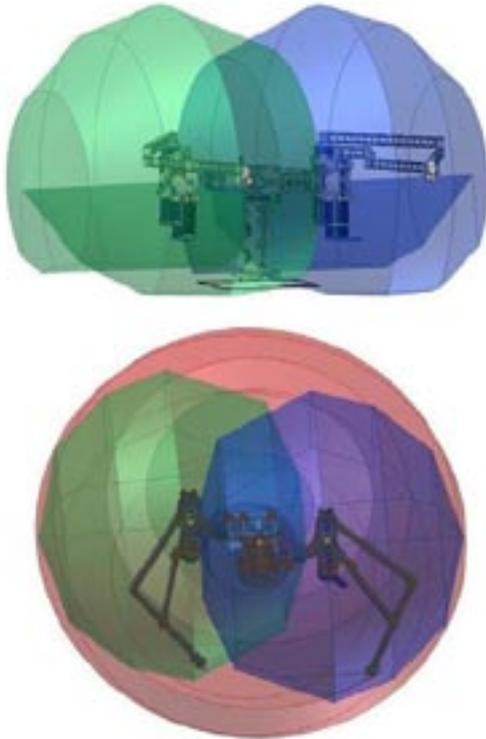


Figura 4: Espacios de trabajo de la interfaz. a) Sin el motor adicional de la base. b) Considerando el giro del motor adicional de la base.

consiguiendo un mayor espacio de trabajo del dispositivo y de los brazos del usuario. La figura 5 muestra esta configuración invertida, para la que se ha dispuesto una estructura auxiliar de perfiles de aluminio en la cual son fijados los dispositivos por medio de dos placas, quedando suspendidos en posición invertida. La distancia entre ambos MasterFinger-2 se puede variar en función la tarea a realizar, adaptándose el espacio de trabajo, de esta forma se incrementa el número de tareas que se pueden ejecutar con la interfaz háptica.

4. Cinemática

La figura 6 muestra el modelo cinemático del mecanismo cinco barras, donde mediante los actuadores M_1 y M_2 se consigue reflejar la fuerza deseada en el efector final P (dedal). El eslabón l_2 se ha prolongado convenientemente hasta el punto P de manera que el objeto a manipular y la mano del usuario se puedan mover libremente sin chocar con los eslabones del mecanismo. Una vez resuelta la cinemática de estos dos g.d.l. la cadena cinemática en serie del mecanismo se resuelve mediante el método Denavit-Hartenberg.

La cinemática directa del mecanismo paralelo viene descrita según

$$\begin{cases} x_p = l_1 \cos(\varphi) + l_4 \cos(\varphi + \psi) \\ y_p = l_1 \sin(\varphi) + l_4 \sin(\varphi + \psi) \end{cases}$$

Dados los ángulos φ y θ medidos por los encoders conocemos la posición de los eslabones l_1 y l_4 . El ángulo γ_1 se obtiene calculando β y aplicando el teorema del coseno sobre los eslabones l_2 , l_3 y l_5 .

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \right),$$



Figura 5: Configuración para manipulación bimanual. Estructura auxiliar de aluminio.

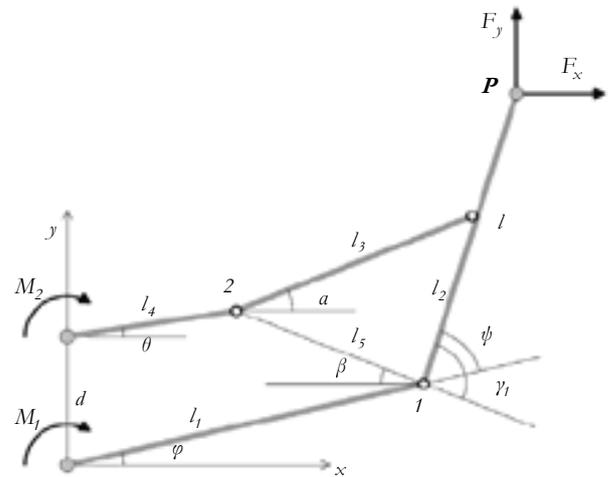


Figura 6: Esquema cinemático del mecanismo cinco barras.

$$l_5 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

$$\cos \gamma_1 = \frac{l_3^2 - l_5^2 - l_2^2}{2 \times l_5 \times l_2},$$

Finalmente, ψ viene dado por

$$\psi = \gamma_1 - \beta - \varphi.$$

El ángulo a se obtiene a partir de las ecuaciones de cierre

$$a = \tan^{-1} \left(\frac{l_1 \times \sin \varphi + l_2 \times \sin(\varphi + \psi) - l_4 \times \sin \theta - d}{l_1 \times \cos \varphi + l_2 \times \cos(\varphi + \psi) - l_4 \times \cos \theta} \right).$$

Aplicando las ecuaciones de equilibrio estático al mecanismo, se obtienen los pares necesarios en los actuadores para reflejar el valor de fuerza deseada. El par en los actuadores está relacionado con la fuerza en el efector final según la traspuesta de la matriz jacobiana J .

$$\mathbf{M} = \mathbf{J}^T \times \mathbf{F},$$

$$\mathbf{J}^T = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix},$$

$$J_{11} = l_1 \left(\frac{\sin(\varphi - a) \sin(\varphi - \psi)}{A} + \sin \varphi \right),$$

$$J_{12} = -l_1 \left(\frac{\sin(\varphi - a) \cos(\varphi - \psi)}{A} + \cos \varphi \right),$$

$$J_{21} = -\frac{l_4 \cos(\pi / 2 + a - \theta) \sin(\varphi - \psi)}{A},$$

$$J_{22} = \frac{l_4 \cos(\pi/2 + a - \theta) \cos(\varphi - \psi)}{A},$$

donde

$$A = \frac{l_2 \cos(\varphi - \psi + \pi/2 - a)}{l}.$$

Esta expresión de la matriz jacobiana, obtenida mediante el planteamiento de la estática del mecanismo, resulta mucho más sencilla que la obtenida a partir de la cinemática inversa presentada en [9], con una reducción en el tiempo de cálculo de un 75%. De esta forma se consigue una menor carga computacional y del procesador, mejorándose el control bilateral.

Con esta configuración del mecanismo cinco barras los índices de rendimiento del dispositivo están muy condicionados por la longitud de los eslabones. La manipulabilidad de la interfaz puede variar considerablemente entre dos puntos próximos en el espacio de trabajo, al igual que la fuerza capaz de reflejar, siendo irregular su distribución dentro del espacio de trabajo. Esto hace que el espacio de trabajo útil sea menor que el espacio de trabajo alcanzable. La longitud de los eslabones del MasterFinger se ha seleccionado maximizando la manipulabilidad y la capacidad de carga. En la siguiente sección se presentan los índices de rendimiento evaluados y la optimización de la longitud de los eslabones en función de dichos índices.

5. Optimización del mecanismo cinco barras.

La longitud de los eslabones del mecanismo cinco barras del MasterFinger se ha optimizado en función del espacio de trabajo necesario y de los índices de rendimiento: *índice de condición global*, GCI (*global conditioning index*), [10] e *índice de carga global*, GPI (*global payload index*) [11]. Se ha aplicado una metodología de optimización multi-criterio [12] en la que se han combinado los dos índices de rendimiento GCI y GPI.

5.1. Espacio de trabajo optimizado.

El espacio de trabajo del mecanismo cinco barras ha sido ampliamente estudiado en la literatura [13]. En el caso de tareas de agarre con dos dedos, más que el espacio de trabajo propio de cada dedo, interesa estudiar el espacio de trabajo común a ambos dedos cuando están sujetando un objeto. Este espacio de trabajo estará además condicionado por el tamaño del objeto a manipular; se ha tenido en cuenta la manipulación de objetos que requieren una separación máxima entre los dedos índice y pulgar de 6 cm. Teniendo en cuenta que el MasterFinger-2 es una interfaz háptica orientada a realizar tareas para las que se requiere un espacio de trabajo relativamente reducido, se ha tomado un espacio de optimización de 15x20 cm². El espacio de trabajo total será el resultante de considerar el giro del tercer motor de cada módulo y el giro del motor adicional común a ambos módulos.

5.2. Índices de rendimiento.

La ecuación de velocidades del mecanismo puede escribirse como

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}}.$$

Donde $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ es el vector de velocidades de los actuadores, $\dot{\mathbf{p}}$ el vector velocidad del efector final.

El número de condición κ de la matriz jacobiana es una medida de la manipulabilidad e isotropía del dispositivo. Si el número de condición es próximo a la unidad, la jacobiana será una matriz bien condicionada, y la interfaz háptica estará en una configuración isotrópica. Aquí, se ha tomado la norma-2 para el número de condición [14]

$$\kappa = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}},$$

donde σ_{\max} y σ_{\min} son el máximo y mínimo valores singulares de la matriz jacobiana. El inverso del número de condición $1/\kappa$ es llamado *índice de condición local*, LCI (*local conditioning index*), el cual depende de la posición dentro del espacio de trabajo. Con el fin de evaluar el comportamiento global en todo el espacio de trabajo, se define el *índice de condición global*, GCI, como

$$GCI = \frac{\int_W \frac{1}{\kappa} dW}{\int_W dW}.$$

Un valor de GCI próximo a la unidad indica una mayor manipulabilidad e isotropía a lo largo del espacio de trabajo, y por tanto un buen diseño mecánico.

Suponiendo el vector de velocidades de los actuadores de valor unitario, los máximos y mínimos valores de velocidad en el efector final serán los máximos y mínimos valores singulares de la matriz jacobiana. Estas velocidades se expresan también según

$$\begin{aligned} \|\mathbf{v}_{\max}\| &= \sqrt{|\lambda_{\max}|}, \\ \|\mathbf{v}_{\min}\| &= \sqrt{|\lambda_{\min}|}, \end{aligned}$$

donde λ_{\max} y λ_{\min} son los valores propios de la matriz

$\mathbf{J}\mathbf{J}^T$. Las velocidades máxima y mínima forman la elipse de manipulabilidad para la posición de trabajo considerada. La representación de estas elipses nos indica la dirección en la que es más fácil desplazar el efector final (según el eje mayor de la elipse) y en que dirección es menos manipulable (eje menor de la elipse). Cuando el eje menor tiende a cero indica proximidad a una configuración singular del mecanismo.

En cuanto a la fuerza reflejada por el efector final, en cada posición del espacio de trabajo la fuerza que es capaz de reflejar la interfaz varía en función de cual sea la dirección de dicha fuerza. Así, otras medidas importantes son el máximo y el mínimo valor de fuerza reflejada para cada posición del efector final, definidas según

$$\begin{aligned} \|\mathbf{F}_{\max}\| &= \sqrt{|\lambda_{F\max}|}, \\ \|\mathbf{F}_{\min}\| &= \sqrt{|\lambda_{F\min}|}, \end{aligned}$$

donde $\lambda_{F\max}$ y $\lambda_{F\min}$ son los valores propios de la matriz

$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{J}^{-1})^T$. Para evaluar la capacidad de carga dentro del espacio de trabajo se suele hacer uso del *índice de carga global*, GPI, expresado como

$$GPI^{\max} = \frac{\int_W \|\mathbf{F}_{\max}\| dW}{\int_W dW},$$

Tabla 1: Optimización del mecanismo cinco barras.

Parámetro	Mínimo (cm).	Máximo (cm).	Incremento (cm).	Total	GCI óptimo	GPI óptimo	DI óptimo
l1	8.0	20.0	1	12	14.0	12.0	13.0
l2	2.0	6.0	0.5	8	6.0	5.0	6.0
l3	2.0	16.0	1	14	11.0	9.0	10.0
l4	2.0	16.0	1	14	4.0	3.0	4.0
l	16.0	20.0	0.5	8	20.0	19.0	20.0
d	4.0	4.0	-	-	4.0	4.0	4.0
GCI					0.432	0.407	0.431
GPI					5.17	5.81	5.35
DI					0.971	0.955	0.979
Número de iteraciones					7,726,587		

$$GPI^{min} = \frac{\int_W \|F_{min}\| dW}{\int_W dW},$$

siendo el GPI^{min} el parámetro más útil para evaluar la capacidad de carga del dispositivo.

Los valores de fuerza así obtenidos suponen un par de entrada ejercido por los motores normalizado a la unidad,

$$\|M\|^2 = M^t M = 1.$$

Dado que ambos motores pueden ser actuados con su valor máximo (supuesto la unidad) al mismo tiempo, la norma-2 no es realista [15], indicando que la norma apropiada en este caso es la norma infinito, que establece que el valor absoluto de los pares ejercidos por ambos motores están independientemente limitados a la unidad.

En este trabajo, los valores reales de las fuerzas máximas y mínimas se han calculado considerando que ambos motores pueden ejercer su máximo par al mismo tiempo. Por lo tanto, el GPI se ha calculado con estos valores de fuerza.

5.3. Índice de diseño multi-criterio.

Para la selección de la longitud de los eslabones del mecanismo cinco barras se ha aplicado una metodología multi-criterio [12], en la que se han combinado los índices de rendimiento GCI y GPI^{min} . Entonces, este índice de diseño multi-criterio se expresa como

$$DI = C_1 \widetilde{GCI} + C_2 \widetilde{GPI^{min}},$$

donde C_i es el peso dado a cada índice de rendimiento. Debido a que en la ecuación anterior el significado físico y unidades dimensionales de los dos índices de rendimiento son diferentes, es necesario transformarlos a un dominio común, en el que su rango varíe entre cero y uno. El GCI es transformado en el dominio común según

$$\widetilde{GCI} = \frac{GCI - GCI_{min}}{GCI_{max} - GCI_{min}},$$

y el índice GPI según

$$\widetilde{GPI^{min}} = \frac{GPI^{min} - GPI_{min}^{min}}{GPI_{max}^{min} - GPI_{min}^{min}}.$$

Cada índice de la ecuación multi-criterio se ha definido de manera que un valor próximo a uno implica un buen comportamiento del dispositivo y, por el contrario, un valor próximo a cero un mal comportamiento. Entonces, el conjunto de longitudes que tengan el mayor DI, será el conjunto de longitudes óptimas de diseño.

5.4. Optimización de la cinemática.

En la optimización del mecanismo cinco barras se ha considerado el espacio de trabajo correspondiente a un rectángulo de 15x20 cm² como se indicado anteriormente.

En las ecuaciones de \widetilde{GCI} y $\widetilde{GPI^{min}}$ se ha tomado para GCI_{max} y GPI_{max}^{min} los valores máximos obtenidos de entre todas las combinaciones de longitudes posibles y para GCI_{min} y GPI_{min}^{min} los valores mínimos. La preferencia dada a cada uno de los dos índices es subjetiva. En este caso se ha considerado más importante la mejora de la manipulabilidad frente a la fuerza refleja, dándole un peso de 0.75 al GCI frente al 0.25 dado al GPI. Así, el DI más próximo a uno es la mejor combinación de longitudes de eslabones y el más próximo a cero la peor de ellas. En orden de reducir la inercia aparente de la interfaz, los motores del mecanismo cinco barras se han ubicado lo más cerca posible el uno del otro, de forma que la longitud d (figura 6) se ha mantenido constante e igual a 4 cm. El espacio de las variables de diseño y los resultados de la optimización se muestran en la tabla 1, donde se aprecia que las longitudes de los eslabones para los casos de óptimo GCI, óptimo GPI y óptimo DI son muy parecidas, o iguales en algunos casos. En todos los casos los valores óptimos corresponden a la configuración ‘codo fuera’ (figura 1) cuyo rendimiento resulta ser muy superior al de la configuración ‘codo dentro’.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la longitud de eslabones con máximo índice de diseño (DI). En la figura 7 se representa el espacio de trabajo total del mecanismo cinco barras y el área rectangular sobre la que se ha realizado la optimización. La figura 8 muestra los espacios de trabajo de los dos mecanismos cinco barras que componen el MasterFinger-2, y en la que también se han representado los rectángulos de trabajo optimizados y el solape entre ellos. La posición relativa de los espacios de trabajo de ambos mecanismos depende de la separación dada a los dos módulos que forman el MasterFinger-2. Esta separación se puede ajustar en función del tamaño del objeto a manipular, de forma que ambos dedos trabajen dentro de su espacio de trabajo óptimo el mayor tiempo posible. En la figura anterior la separación de los módulos es de 15 cm. El índice de condición local (LCI) y la mínima de las máximas fuerzas reflejadas F_{min} en cada punto del el espacio de trabajo se muestra en la figura 9 y figura 10 respectivamente. La variación de estos parámetros entre puntos cercanos

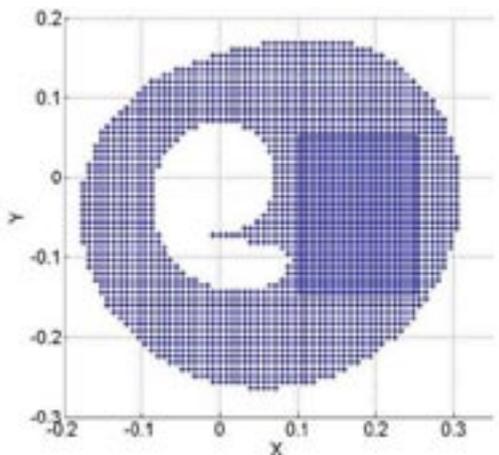


Figura 7: Espacio de trabajo total del mecanismos cinco barras y espacio de trabajo optimizado.

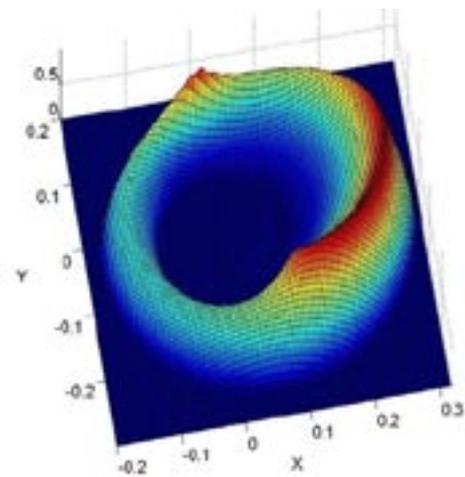


Figura 9: Índice de condición local LCI.

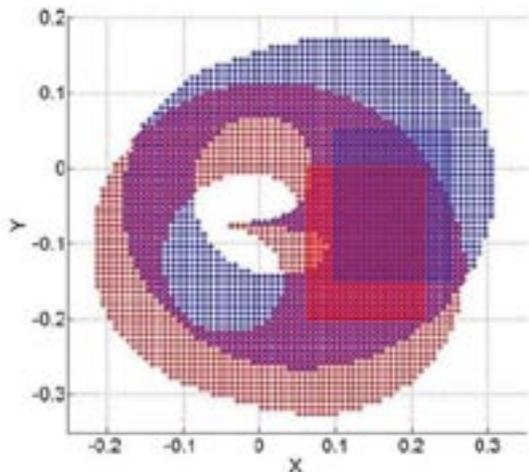


Figura 8: Espacios de trabajo de los dos mecanismos cinco barras del MasterFinger-2.ejemplo de figura.

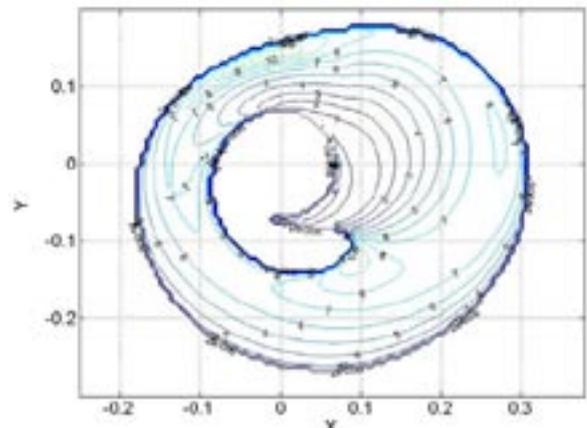


Figura 10: Mínimas de las máximas fuerzas (N) a reflejar en cualquier dirección.

dentro del espacio de trabajo no es un comportamiento deseable. La figura 11 representa las elipses de manipulabilidad para varios puntos del espacio de trabajo, donde elipses cuya forma se aproxime a una circunferencia significa que la manipulabilidad es la misma en cualquier dirección en la que se desplace el efector final. Por el contrario, elipses cuyos ejes principales tengan valores diferentes significa que la manipulabilidad varía con la dirección del desplazamiento. Si el eje menor de la elipse tiende a cero indica proximidad a un punto singular. La figura 10 representa las fuerzas reflejadas en N para un par máximo en los actuadores de 1 Nm. Por tanto, las fuerzas reales reflejadas se obtienen multiplicando dichos valores de fuerza por el valor de par real transmitido por los actuadores. Los actuadores utilizados en el MasterFinger dan un par nominal continuo de 0.41 Nm y un par instantáneo pico de 1.9 Nm. Las fuerzas reflejadas para estos valores de par se muestran en la figura 12 y figura 13 respectivamente. De acuerdo a los requisitos de diseño, el par nominal de los actuadores ha sido seleccionado de forma que se puedan manipular objetos de hasta 2 N de peso.

6. Conclusiones

Este artículo describe el proceso de diseño mecánico de una interfaz háptica multidedo. Los principales requisitos de diseño establecidos han sido: fácil escalabilidad del

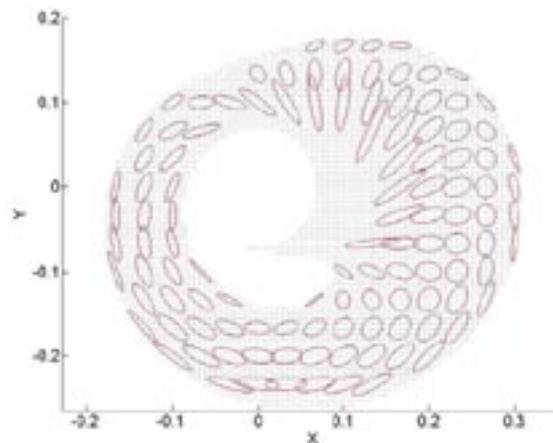


Figura 11: Elipses de manipulabilidad.

dispositivo, espacio de trabajo y rango de fuerzas adecuado a la tarea, buena manipulabilidad, baja inercia y suficiente rigidez de la estructura.

Las necesidades de escalabilidad se han resuelto con un diseño modular compacto, donde cada módulo es un mecanismo serie-paralelo en el que los actuadores se sitúan próximos a la base del mecanismo. De esta forma se consigue reducida inercia y buena rigidez de la estructura. El mecanismo serie-paralelo es un mecanismo cinco barras de dos grados de libertad, donde las longitudes de las barras de este mecanismo se han optimizado en base a la manipulabilidad y la capacidad de carga del dispositivo. Para ello se han utilizado

respectivamente los índices de rendimiento *índice de condición global*, e *índice de carga global*, y se han combinado mediante una metodología de optimización multi-criterio. Los resultados muestran que en todo caso la configuración ‘codo fuera’ tiene un rendimiento muy superior a la configuración ‘codo dentro’ del mecanismo cinco barras. El espacio de trabajo sobre el que se ha realizado la optimización de este mecanismo ha sido un rectángulo de 15x20 cm². Finalmente, la mayor amplitud de los movimientos de la muñeca y del brazo del usuario se consigue mediante el tercer motor de cada módulo y el motor redundante común a los dos módulos del MasterFinger-2.

La escalabilidad de la interfaz la hace adecuada para realizar, tanto tareas de exploración con un solo dedo, como tareas de agarre con dos dedos y de manipulación con dos manos (cuatro dedos). Además, la facilidad para modificar la posición relativa de los distintos módulos, amplía sus posibilidades de aplicación a un mayor número de tareas y tamaño de objetos a manipular.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comunidad de Madrid en el marco del IV PRICIT a través del proyecto TECHNOFUSION (P2009/ENE/1679), el proyecto TEMAR bajo la beca DPI2009-12283 del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) y la UPM bajo 'Formación de Personal Investigador'.

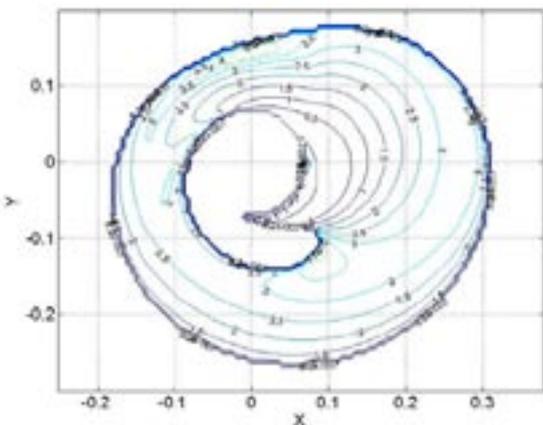


Figura 12: Mínimas de las máximas fuerzas (N) a reflejar en cualquier dirección. Par nominal: 0.41 Nm.

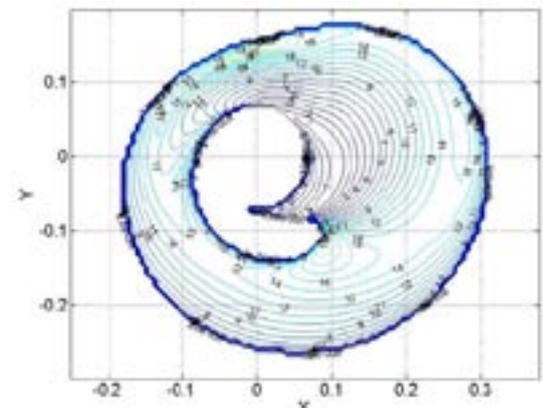


Figura 1: Mínimas de las máximas fuerzas (N) a reflejar en cualquier dirección. Par pico: 1.90 Nm.

Referencias

- [1] JK Salisbury, MA Srinivasan, "Phantom-Based Haptic Interaction with Virtual Objects" in *IEEE Comput. Graph. Appl.* Vol. 17 no 5 pp 6-10, 1997.
- [2] P García-Robledo, J Ortego, J Barrio, I Galiana, M Ferre, R Aracil, "Multifinger haptic interface for bimanual manipulation of virtual objects interaction between two hands and virtual objects with masterfinger ", *2009 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games, HAVE 2009*, Lecco, 2009, pp. 30-35.
- [3] J López, JL Torres, A Giménez, I Galiana, M Ferre, "Interfaz háptica para tareas de manipulación", *CNIM2010 - XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Ciudad real, 2010.
- [4] P Fischer, R Daniel, KV Siva, "Specification and design of input devices for teleoperation," in *Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, OH, USA, 1990, pp. 540-545.
- [5] SS Lee, JM Lee, "Design of a general purpose 6-DOF haptic interface," *Mechatronics*, vol. 13, pp. 697-722, 2003.
- [6] S Cobos, M Ferre, MA Sánchez-Urán, J Ortego and R Aracil, "Human hand descriptions and gesture recognition for object manipulation," *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng.*, vol. 13, pp. 305-317, 2010.
- [7] M Monroy, M Ferre, J Barrio, V Eslava, I Galiana, "Sensorized thimble for haptics applications," in *IEEE 2009 Int. Conf. on Mechatronics, ICM 2009*, Malaga, 2009.
- [8] N Klopčar, J Lenarčič, "Kinematic model for determination of human arm reachable workspace," *Meccanica*, vol. 40, pp. 203-219, 2005.
- [9] M Monroy, M Oyarzabal, M Ferre, A Campos, J Barrio, "MasterFinger: Multi-finger Haptic Interface for Collaborative Enviorements", *Proc of the EuroHaptics*, vol. 5024 (2008), 411-419.
- [10] C Gosselin, J Angeles, "Global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators," *J Mech Transm Autom Des*, vol. 113, pp. 220-226, 1991.
- [11] H Ozaki, H Wang, X Liu, F Gao, "Atlas of the payload capability for design of 2-DOF planar parallel manipulators," in *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Part 4 (of 4)*, Beijing, China, 1996, pp. 1483-1488.
- [12] JH Lee, BJ Yi, SR Oh, IH Suh, "Optimal design and development of a five-bar finger with redundant actuation," *Mechatronics*, vol. 11, pp. 27-42, 2001.
- [13] JJ Cervantes-Sánchez, JC Hernández-Rodríguez, JG Rendón-Sánchez, "On the workspace, assembly configurations and singularity curves of the RRRRR-type planar manipulator," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, pp. 1117-1139, 2000.
- [14] XJ Liu, J Wang, G Pritschow, "Performance atlases and optimum design of planar 5R symmetrical parallel mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 41, pp. 119-144, 2006.
- [15] JP Merlet, "Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots", *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 128, pp. 199-206, 2006.