

DISEÑO MECATRÓNICO DE UN DEDO ANTROPOMÓRFICO PARTE I: MECÁNICA

Francisco García-Córdova, José J. Martínez Alvarez,
Roque J. Salterén Pazmiño, Antonio Guerrero González, y Juan López Coronado

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Politécnica de Cartagena.
Campus Muralla del Mar. C/Doctor Fleming S/N, 30202, Cartagena, Murcia, España.
francisco.garcia/ jjavier.martinez/ roque.saltaren/ antonio.guerrero/ jl.coronado/ @upct.es

Resumen

En este trabajo, presentamos el diseño de un prototipo de un dedo antropomórfico. La meta principal perseguida durante el desarrollo del dedo artificial ha sido el de diseñar un sistema ligero y pequeño con cinemática antropomorfa, el cual fuera fácil de reproducir e integrarlo a pequeñas manos robots. El artículo describe las características cinemática y estructural del dedo. El sistema de actuación que emula el sistema muscular del dedo es representado por un sistema de transmisión basado por tendones y motores de corriente continua. El dedo antropomorfo diseñado presenta dos grados de libertad. Cada eslabón del dedo tiene asociado dos tendones (agonista/antagonista). El primero es causante de la flexión del dedo y el segundo de la extensión del mismo. El propósito de diseñar un dedo robot antropomorfo es la de poder demostrar y validar controladores neuronales basados en modelos neurobiológicos.

Palabras clave: Dedo antropomorfo, sistema de transmisión por tendones, tendones (agonista-antagonista), controladores neurobiológicos.

1 INTRODUCCIÓN

En los recientes años, muchos esfuerzos han sido consolidados al diseño, construcción y control de manos robots de múltiples dedos. El desarrollo y uso de dedos artificiales sobre manos robots es complicado debido a que encierra muchas subáreas de investigación, incluyendo los diseños de mecanismos, diseños de sistemas de actuación, teoría de control, sensores táctiles, planeación de agarre, calibración cinemática y telemanipulación [1]-[11].

El trabajo de investigación esta enfocado al diseño de un dedo robot antropomorfo que permita explorar la cinemática de un dedo humano; así como la aplicación de algoritmos de control inspirados en la neurobiología.

La estructura cinemática de un robot manipulador a menudo toma la forma de una cadena cinemática de lazo-abierto. Ésta comúnmente consisten de eslabones conectados en series. Para un manipulador de cadena abierta con n grados de libertad (GdL) presentan n articulaciones independientes, la estructura es mecánicamente simple y de fácil construcción. Para reducir la inercia de un manipulador, es a menudo necesario usar un sistema de transmisión que permita al actuador estar localizado remotamente del punto de aplicación. Los componentes y configuraciones de los sistemas de transmisión pueden variar en formas, tales como, trenes de engranajes, trenes de poleas usando correas, conexiones de levas y seguidores, y así sucesivamente [2], [5], [11].

En este trabajo, presentamos el diseño de un prototipo de un dedo antropomórfico. La meta principal perseguida durante el desarrollo del dedo artificial ha sido el de diseñar un sistema ligero y pequeño con cinemática antropomorfa, el cual fuera fácil de reproducir e integrarlo a pequeñas manos robots. El objetivo del sistema de transmisión es la de conseguir que emule a los sistemas de tendones biológicos como en los animales, y en este sentido el mecanismo de transmisión más afín es el tren de poleas y correas (sistema de transmisión por tendón). La principal ventaja de este tipo de transmisión antes mencionado es la de localizar los actuadores remotamente del dedo. Esto permite reducir el tamaño, peso y la inercia del dedo. Como desventaja deben superar los inconvenientes relacionados con la flexibilidad de los tendones, tales como las vibraciones, el backlash o holgura del tendón y el rozamiento que origina una pérdida de potencia en la transmisión. De hecho, los sistemas biológicos se caracterizan por tener un alto rendimiento de transmisión, ya que la fricción entre los tendones y las vainas de transmisión de éstos sobre las articulaciones es ínfima. El backlash es corregido aplicando un pretensionado apropiado en los tendones.

Este artículo está organizado de la siguiente

forma. En la Sección 2 se muestra un estudio sobre el dedo humano, que permite dar la información necesaria para justificar el antropomorfismo del dedo diseñado. La Sección 3 presenta la descripción del dedo y su estructura mecánica. También se presenta la configuración del sistema de transmisión por tendones y tres representaciones que son útiles a la hora de determinar la cinemática del mecanismo y de comprender el funcionamiento del sistema. Las ecuaciones fundamentales de la dinámica del dedo antropomorfo es descrita en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5, conclusiones y trabajos a futuro son indicados.

2 ESTUDIO DEL DEDO HUMANO

En la mano humana, cada dedo presenta un hueso metacarpiano y falanges proximal, media y distal. El pulgar solamente presenta las falanges proximal y distal. El dedo humano esta compuesto de tres principales articulaciones; articulación metacarpofalángica (MCP): que une la falange metacarpiana y la proximal de un dedo o pulgar; articulación interfalángica proximal (PIP): localizada entre las falanges media y proximal del dedo; articulación interfalángica distal (DIP): ubicada entre las falanges media y distal del dedo. La Figura 1 muestra un esquema del dedo índice y sus falanges y tendones flexores.

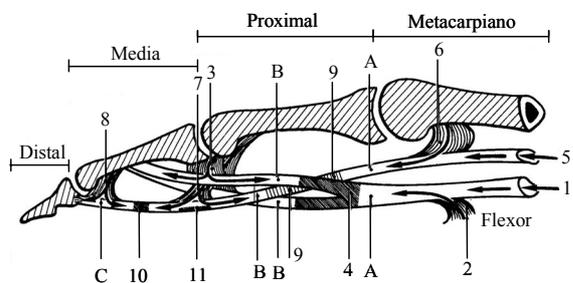


Figura 1: Dedo índice: (A) zona proximal, (B) zona intermedio, (C) zona distal, (1) microvasos longitudinales intrínsecos, (2) vaina sinovial, (3) vinculum brevis, (4) segmento avascular, (5) y (6) vasos comparables a los del flexor superficial, (7) vinculum longus, (8) vinculum brevis sobre la tercera falange, y (9,10,11) segmentos de zonas avasculares.

Todos los dedos tienen similares aspecto al mostrado en la Figura 1. La dimensiones de las falanges de un dedo índice se muestran en la Tabla 1. La articulación metacarpofalángica presenta dos grados de libertad, que se reflejan en los movimientos de abducción-adducción y los de flexión-extensión. Las articulaciones interfalángicas solo presentan un grado de libertad

permitiendo realizar los movimientos de flexión-extensión. Los rangos de movimiento de las articulaciones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Dimensiones del dedo índice en especímenes humanos (mm)

Longitud de la falange distal	19.67	±	1.03
Longitud de la falange media	24.67	±	1.37
Longitud de la falange proximal	43.57	±	0.98
Longitud metacarpal	71.57	±	5.60
Espesor de la articulación DIP	5.58	±	0.92
Espesor de la articulación PIP	7.57	±	0.45
Espesor de la articulación MCP	15.57	±	0.84

Tabla 2: Rangos de movimientos del dedo índice en el ser humano (estudios realizados en siete especímenes de manos)

Articulación	Movimiento	Rango de Movimiento
DIP	Flexión/Extensión	50.36°/6.6°
PIP	Flexión/Extensión	89.50°/11.7°
MCP	Flexión/Extensión	85.3°/18.4°
MCP	Abducción/Adducción	50.4°/6.6°

En los dedos hay tres básicos grupos de músculos. Los flexores extrínsecos originados en la parte anterior del antebrazo; el flexor profundo y superficial perteneciente a este grupo. Los extensores extrínsecos originados en la parte posterior del antebrazo; el músculo extensor digitorum pertenece a este grupo. Finalmente, los músculos intrínsecos cuyo origen va del distal a la articulación de la muñeca; a este grupo comprenden los lumbricales y los interóseos. Cada grupo juega un papel importante en el movimiento y la estabilidad de los dedos. La Figura 2 muestra los tendones y músculos que forman el sistema de actuación del dedo.

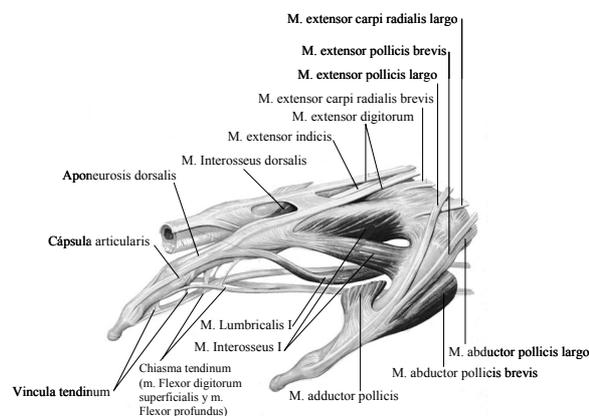


Figura 2: Tendones y músculos del dedo índice.

Los tendones realizan un papel muy importante en

los movimientos del dedo. Para una buena modelización es necesario calcular las fuerzas de los músculos a partir de los desplazamientos de cada tendón y relacionar estos desplazamientos con los angulares que se producen en las articulaciones. Landsmeer [13] propuso un modelo para las articulaciones y tendones de los dedos. Este trabajo fue más tarde extendido por Storace [14]. Fischer [15] muestra que el ángulo de la articulación DIP depende del ángulo PIP debido a las interacciones de las falanges media y distal. El modelo de Lamdsmeer nos dice que el desplazamiento x de un tendón es linealmente proporcional a la articulación θ . Storace propuso un modelo que combina contribuciones de dos articulaciones. La Figura 3, muestra un simple tendón controlando la posición de una articulación.

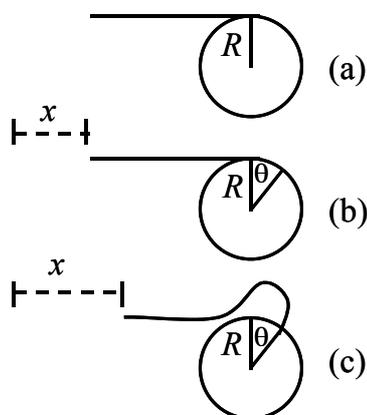


Figura 3: Modelo de un tendón unido a una articulación del dedo. a) Posición inicial. b) Desplazamiento del tendón $x=R\theta$. c) Tendón flojo $x > R\theta$.

Por otra parte, Becker [12] se basó en los estudios previos de Lamdsmeer y Storace para relacionar medidas experimentales de los rangos de movimientos de las articulaciones en función con los tendones. Becker obtuvo las siguientes relaciones para poder calcular los desplazamientos de los tendones en función de los ángulos de las articulaciones del dedo, y esta relación se calcula con las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \theta_{PIP} &\leq -\frac{R_{MCP}}{R_{PIP}}\theta_{MCP} + \frac{X_E}{R_{PIP}} \quad (\text{Extensor}) \\ \theta_{PIP} &\geq -\frac{R_{MCP}}{R_{PIP}}\theta_{MCP} + \frac{X_F}{R_{PIP}} \quad (\text{Flexor}) \quad (1) \\ \theta_{PIP} &\leq -\frac{R_{MCP}}{R_{PIP}}\theta_{MCP} + \frac{X_I}{R_{PIP}} \quad (\text{Intrínseco}) \end{aligned}$$

Con este estudio podemos observar lo complejo que es el dedo humano y lo difícil de reproducirlo. Debido a esto, el grupo *NEUROCOR* del Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena ha diseñado un

dedo con menos complejidad pero guardando el antropomorfismo con el dedo humano. Una de las diferencias radica en el número de grados de libertad y en el tamaño de las falanges.

3 DESCRIPCIÓN DEL DEDO ANTROPOMÓRFICO

3.1 Mecanismo del dedo

El dedo antropomorfo diseñado esta constituido por dos eslabones conectados por articulaciones revolución (R), y cuya representación es la de un mecanismo de 2R. El dedo presenta dos grados de libertad. Las dos articulaciones del dedo presentan los movimientos de flexión-extensión. La primera articulación robótica se corresponde fisiológicamente a la articulación interfalángica proximal (PIP); que une la falange proximal y la media. La última articulación robótica representa a la articulación interfalángica distal (DIP); que articula a la falange media y distal. La Figura 4 representa la asignación del sistemas de coordenadas de los eslabones del dedo antropomorfo y la Tabla 3 muestra los parámetros Denavit-Hartenberg (D-H) del dedo.

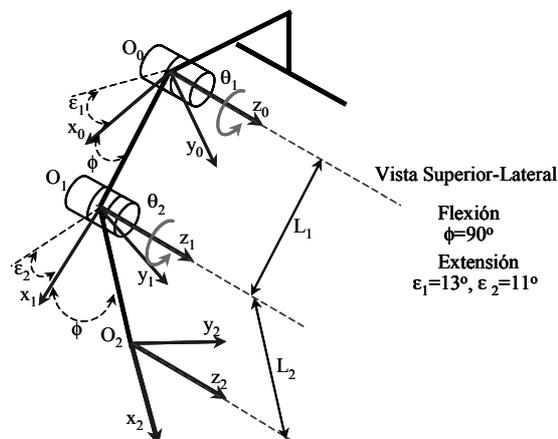


Figura 4: Representación de la asignación del sistema de coordenadas de referencias a los eslabones de la cadena cinemática del dedo antropomorfo.

Tabla 3: Representación de Denavit-Hartenberg (D-H) de la cadena cinemática del dedo antropomorfo.

Parámetros de coordenadas de los eslabones del dedo antropomorfo.				
Articulación	θ_n	α_n	a_n	d_n
1	θ_1	0	L_1	0
2	θ_2	0	L_2	0

3.2 Configuración del sistema de tendones

3.2.1 Estructura de los tendones

Fundamentalmente existen dos tipos de configuraciones para sistemas de transmisión basados en poleas y tendones: las cerradas y las abiertas. Los manipuladores robóticos accionados bajo tendones, presentan tres configuraciones principales de cadenas cinemáticas [2]. Estas pueden ser clasificadas en configuraciones de n , $n+1$ y $2n$ actuadores (m), donde n representa el número de grados de libertad (GdL). La clasificación de las configuraciones de los sistemas de transmisión por tendones se muestra en la Figura 5.

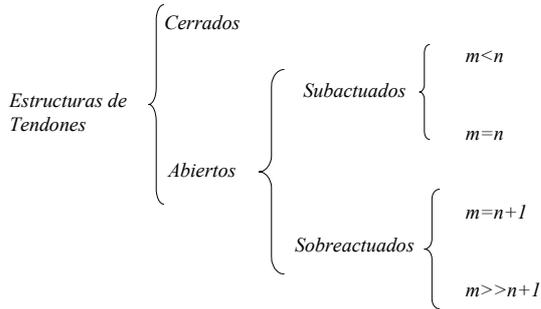


Figura 5: Clasificación de los sistemas de transmisión por tendones.

En la configuración cerrada [19], las correas envuelven las poleas en un lazo cerrado como se puede ver en la Figura 6(a), dependiendo el rendimiento en la transmisión de potencia, de la fricción entre la correa y la polea. El movimiento que se consigue es bidireccional, por lo que el número de actuadores coincidirá con el número de grados de libertad del sistema ($m=n$), y esta es la propiedad más preciada de este tipo de configuración. La configuración de n actuadores para n GdL presentada en la Figura 6(a) muestra cómo un actuador rotacional puede ser usado para manejar una articulación simple usando un par de tendones opuestos. Este método requiere un pretensado del sistema para prevenir el destensado de los tendones cuando la articulación se mueve a altas velocidades o cuando la articulación es inesperadamente perturbada. Este pretensado, sin embargo, es una indeseable fuente de fricción y backlash, y degrada el desarrollo del sistema.

En cambio, los tendones en configuración abierta [19] se caracterizan por tener un extremo conectado al eslabón y el otro al músculo, de forma que éste es capaz de tirar del tendón. Es importante destacar, que en estos mecanismos los tendones nunca funcionan por compresión y que los pares de fuerza son unidireccionales. Ejemplo de esta configuración se muestra en la Figura 6(b) que con-

siste en usar un actuador y un resorte. Esta configuración impide que se produzca una baja cocontracción cuando un resorte fuerte es usado, el cual es necesario para una fuerza de extensión alta y un tiempo de respuesta rápido. La alta disipación de energía en el actuador es requerida para tirar constantemente y mantener un par cero en la articulación. Este método fue usado en la "Hitachi hand" desarrollada por Nakano [17].

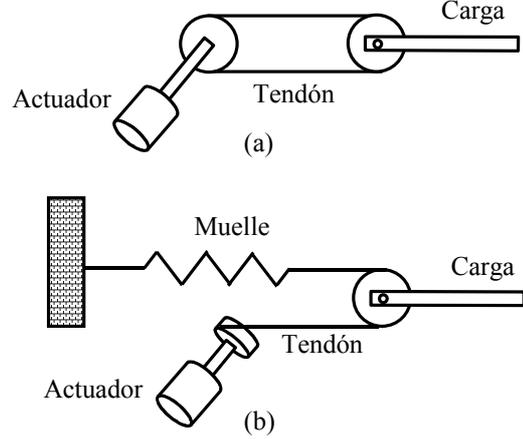


Figura 6: (a) Modelo de una articulación simple accionada por un actuador rotacional. Configuración cerrada. (b) Estructura de un actuador que flexiona y un resorte extensiona a una articulación simple. Configuración abierta.

Estos tendones se pueden clasificar según el grado de actuación o de control sobre los grados de libertad, utilizando la proposición de Morecki [16]: "Para controlar completamente un manipulador con n grados de libertad, se requieren como mínimo $n+1$ actuadores".

Si cada articulación debe ser flexionada independientemente y extendida por un actuador común, $n+1$ es el número mínimo de tendones y actuadores necesarios para el control de un manipulador n GdL. La Figura 7(a) muestra un ejemplo de un manipulador con dos GdL. Morecki [16] usó siete cables para accionar un manipulador de 6 GdL. En una forma similar, Salisbury [18] diseñó la mano Stanford/JPL usando cuatro cables para cada dedo de 3 GdL, así que los tres dedos son independientemente controlables. Esta construcción tiene la ventaja de la reducción del número de actuadores por GdL y además reduce el peso y volumen del conjunto de actuadores. Una desventaja es que una simple extensión de un actuador puede oponerse antagonicamente a los otros actuadores de flexión. Como resultado, si se desea una tensión de cocontracción mínima en los actuadores de flexión entonces, la cocontracción en el tendón de extensión debe ser n veces esa tensión

mínima. Además, si los pares de extensión en la articulación son iguales a los pares de flexión, el actuador de extensión debe de ser más grande que los actuadores de flexión, afectando al ancho de banda y al conjunto de actuadores.

En los manipuladores suficientemente actuados ($m > n$), es posible controlar todos los grados de libertad del mecanismo robótico. Esta razón lleva a elegir esta disposición de tendón como la más adecuada en la implantación de un dedo robótico similar a los biológicos. Así pues, se ha optado por utilizar un número de tendones muy superior al número de grados de libertad del sistema. Como ejemplo, en la configuración $2n$, dos actuadores manejan una simple articulación, cada uno de los actuadores tira de tendones opuestos de manera agonista/antagonista. Esta configuración se muestra en la Figura 7(b). Aunque este método incrementa el volumen del conjunto de actuadores, la configuración $2n$ proporciona pares de fuerzas de cocontracción bajas, articulaciones independientemente controladas, e igual fuerza de actuadores y tendones. Jacobsen *et al.* [1] han desarrollado la mano Utah/MIT usando la configuración $2n$. Como ventajas de esta configuración se pueden citar las siguientes: las fuerzas de tensión en los tendones son pequeñas, es posible realizar control independiente de articulación y conseguir uniformidad de fuerza en los actuadores y tendones. Los principales inconvenientes son el incremento del peso y volumen del conjunto de actuadores, así como la complejidad en el control debido al gran número de tendones y actuadores.

El dedo diseñado es un claro ejemplo de esta estrategia, donde se utiliza un total de $m=2n$ tendones y actuadores por dedo. Por cada articulación se utilizan dos tendones y actuadores, desarrollando una función antagonista.

3.3 Representación estructural del dedo

3.3.1 Descripción funcional

En la representación funcional, se describen todos los elementos mecánicos relevantes en un esquema gráfico: ejes, poleas, correas, entre otros elementos. En los tendones enrutados en forma abierta, un extremo del tendón está fijo a la polea conducida y el otro extremo es tirado mediante un actuador lineal o se encuentra asociado a una polea conductora. En estos mecanismos el brazo lo constituye el eslabón de la cadena cinemática, el cual mantiene constante la distancia entre los ejes z_i y z_j . En la Figura 8 se describe funcionalmente el enrutamiento de tendones para el dedo antropomorfo.

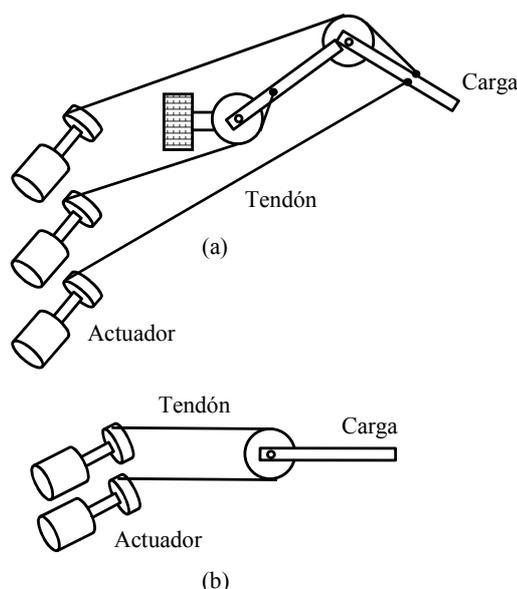


Figura 7: (a) Ejemplo de un manipulador de dos grados de libertad accionado por tres actuadores. (b) Modelo de una articulación simple accionada por dos actuadores.

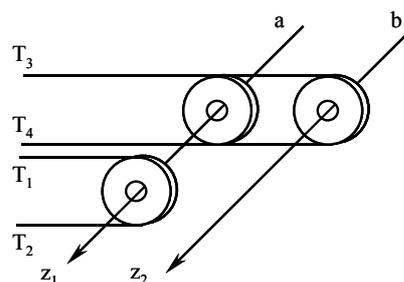


Figura 8: Representación funcional del sistema de transmisión antagonista mediante tendones para un dedo de dos grados de libertad.

3.3.2 Descripción esquemática plana

La representación plana permite visualizar fácilmente los enrutamientos de tendones que son denominados líneas de transmisión, ya que a través de ellos se comunica potencia al elemento terminal. En la Figura 9 se ha representado el esquema plano correspondiente a la representación funcional de un sistema de tendones en configuración abierta.

A esta clase de enrutamiento se la denomina *tipo paralelo*. En este tipo de enrutamiento, la rotación de la polea conductora supone una rotación en el mismo sentido de la polea conducida.

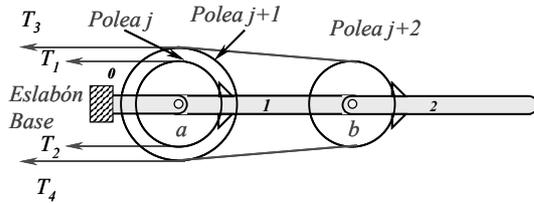


Figura 9: Representación esquemática plana del sistema de transmisión por tendones para un dedo de dos grados de libertad.

3.3.3 Descripción mediante un grafo

La representación de un sistema de transmisión por poleas a través de un grafo es bastante importante a la hora de estudiar las propiedades de enrutamiento del mismo. Así pues, los eslabones son identificados como vértices y las articulaciones se corresponden con aristas, que estarán etiquetadas con el nombre del eje de articulación. Las aristas pueden ser de tres tipos en función del tipo de par cinemático:

- Par de Rotación. Estos pares se representan mediante una arista simple.
- Par Polea. Tipo Paralelo. A estos pares les corresponde una arista doble.
- Par Polea. Tipo Cruce. El grafo aparecen representadas con una línea gruesa.

La Figura 10 muestra la descripción del sistema de transmisión del dedo por un grafo.

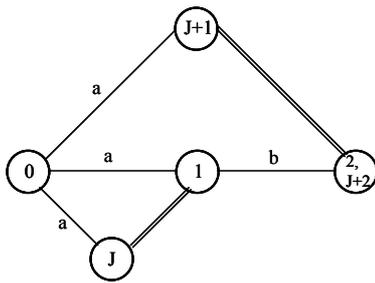


Figura 10: Representación mediante un grafo de un sistema de transmisión mediante poleas para un dedo de dos grados de libertad.

3.4 Dedo antropomorfo

La Figura 11 muestra el diseño del dedo multi-articulado con dos grados de libertad independientes. El dedo tiene las siguientes dimensiones:

87(Largo)x 26(Ancho)x18(Espesor)mm. El material empleado en la construcción del dedo fue Nylamid un plástico a base de Nylon; éste pesa de 2 a 8 veces menos que los metales que sustituye. El dedo pesa 0.108 Kg. con los sensores de posición, las poleas y tendones. Por otra parte, la longitud para las falanges media y distal son $L_1=55\text{mm}$, y $L_2=50\text{mm}$, respectivamente. Las articulaciones PIP y DIP presentan rangos de movimientos mayores de 90° y similares a los de un dedo humano. La Tabla 4 muestra las comparaciones de un sistema biológico con respecto a nuestro diseño.

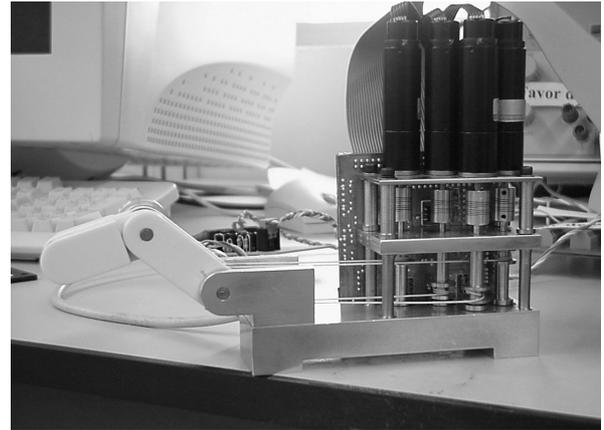


Figura 11: Estructura mecánica del dedo antropomorfo.

Tabla 4: Elementos del dedo antropomorfo.

Sistema biológico	Dedo antropomorfo
Huesos	Plástico ligero (Nylamid)
Articulaciones	Articulaciones revolución
Tendones	Polietireno de alto peso molecular
Músculos	Motores de CC como músculos artificiales

En el diseño del dedo, cada articulación es accionada por dos motores de corriente continua autoreversibles (Micro-motores de Maxon 16mm) y por tendones, que emulan el sistema músculo-esquelético humano. Con una apropiada caja de engranaje planetario y un acoplamiento flexible multi-radial (para tirar y ser tirado), y una serie de cables (tendones) con propiedades lineales, los actuadores aproximan su comportamiento al de un músculo humano (ver Figura 12). Con el sistema de actuación que presentamos en la Figura 11 obtenemos una de las propiedades del sistema muscular, la cual es la relación de longitud-fuerza. El sistema de tendones es enrutado a través de poleas locas de bronce. EL dedo presenta un total de cuatro micro-motores Maxon ubicados en la parte posterior del dedo y su base esta realizada

de aluminio y acero inoxidable. Los ejes de los motores son de bronce para disminuir los rozamientos entre los materiales.

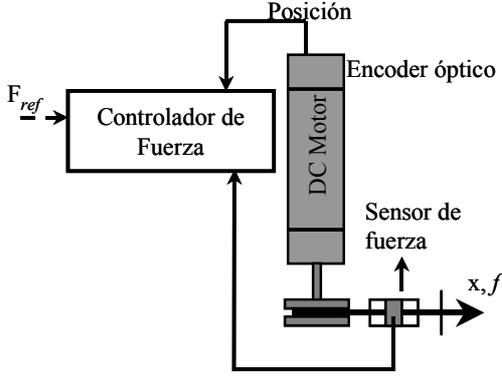


Figura 12: Diagrama esquemático del músculo artificial usando un motor de CC.

Para medir la posición de la articulación, velocidad y dirección de rotación usamos potenciometros de rotación continua de precisión (RS-Spectrol). Finalmente, Sensores táctiles se instalaron en el extremo del dedo y son sensores de fuerza resistivos (FSR Force sensor resistors). Estos sensores cubren la superficie curvada de la yema del dedo (FSR no. 402 de Interlink Electronics USA). Los sensores FSR son laminas delgadas de polímeros, el cual en respuesta a un incremento de la fuerza aplicada a su superficie de contacto activa muestra un decremento en la resistencia entre sus terminales.

4 MODELO DINÁMICO

En la modelización de sistemas dinámicos robóticos constituidos únicamente por barras (eslabones) conectadas a través de pares inferiores, el sistema de transmisión se materializa por medio de un mecanismo articulado. Por esta razón el mapeo entre el espacio de articulación y el espacio de elemento-terminal sólo requiere tener en cuenta una transformación lineal mediante el jacobiano del sistema. En cambio, cuando el sistema de transmisión además de incluir el mecanismo articulado presenta un sistema de poleas y correas, que constituyen nuevos elementos de la cadena cinemática, hay que tener en cuenta las características estructurales del sistema. En este sentido se requiere una nueva transformación lineal entre el espacio de articulación y el espacio de elemento terminal a través de la matriz estructural. Esta matriz depende del enrutamiento de los tendones a través de las poleas y del dimensionado de las mismas, llevando a cabo un mapeo entre los desplazamientos angulares de las articulaciones y los lineales de los tendones.

La dinámica generalizada del movimiento de una cadena cinemática abierta puede ser obtenida usando Lagrange. Las ecuaciones del movimiento queda expresada como:

$$\mathbf{M}(\Theta)\ddot{\Theta} + \mathbf{C}(\Theta, \dot{\Theta})\dot{\Theta} + \mathbf{G}(\Theta) = \tau$$

donde $\mathbf{M}(\Theta)$ es la matriz de inercia, Θ es el vector que representa los ángulos del sistema, $\mathbf{C}(\Theta, \dot{\Theta})$ es el vector que representa los términos de Coriolis y los efectos centrífugos, $\mathbf{G}(\Theta)$ es la gravedad, τ es el vector que representa los pares articulares de la cadena cinemática abierta. La transformación del desplazamiento y la fuerza entre el espacio articular del dedo y el espacio de los tendones es expresado como[19]:

$$\tau = \mathbf{R}^T \mathbf{B}^T \mathbf{F} \quad (2)$$

y

$$\mathbf{S} = \mathbf{B} \mathbf{R} \Theta$$

donde \mathbf{R} es la matriz de los radios de las poleas, \mathbf{B} es la matriz que describe el tipo de enrutamiento de los tendones, y \mathbf{F} representa la matriz de las fuerzas de los tendones.

Hay que destacar que los tendones sólo pueden actuar a tensión y nunca a compresión, por lo que el número de tendones debe superar como mínimo en uno a los grados de libertad del sistema. Esto supone una redundancia en las fuerzas de los tendones, por lo que se necesitan nuevas estrategias de control para tener en cuenta este hecho.

En la Figura 12 se describe el modelo de actuación de los tendones. Este se encuentra compuesto por un motor de CC conectado a un tren reductor con un radio de transmisión adecuado para proporcionar suficiente par a la carga, y una polea conductora rígidamente asociada al árbol de entrada.

La modelización del sistema completo viene determinada a partir de la modelización de sus partes constituyentes:

- Modelo de los Tendones.
Se proporciona el modelo dinámico incluyendo las poleas.
- Modelo dinámico del Actuador.
Aquí se incluye el sistema motor-reductor.

La ecuación dinámica total del sistema es [19]:

$$\left(\mathbf{M}(\Theta) - \tilde{\mathbf{M}} \right) \ddot{\Theta} - \tilde{\mathbf{B}} \dot{\Theta} + \mathbf{C}(\Theta, \dot{\Theta}) + \mathbf{G}(\Theta) = \mathbf{R}^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_m^{-1} \tau_m \quad (3)$$

donde \mathbf{R}_m una matriz de poleas conductoras, τ_m los pares motores,

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{M}} &= \mathbf{R}^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{J}_m \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{B} \mathbf{R} \\ \tilde{\mathbf{B}} &= \mathbf{R}^T \mathbf{B}^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{B}_m \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{B} \mathbf{R},\end{aligned}\quad (4)$$

$\tilde{\mathbf{M}}$ y $\tilde{\mathbf{B}}$ representan la matriz de inercia del rotor y la matriz de amortiguamiento respectivamente, ambas reflejadas en el espacio de articulación.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo, se ha presentado el diseño mecánico de un dedo antropomorfo, así como el estudio de la anatomía del dedo humano, permitiendonos justificar el antropomorfismo que existe entre éste y el dedo robótico diseñado en el seno del grupo NEUROCOR del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena. El dedo antropomórfico presenta dos grados de libertad. Cada eslabón del dedo tiene asociado dos tendones (agonista/antagonista). El primero es causante de la flexión del dedo y el segundo de la extensión del mismo. El sistema de actuación que emula el sistema muscular del dedo es representado por un sistema de transmisión basado por tendones y micro-motores de corriente continua. El diseño es muy ligero y fácil de reproducir para integrarse a pequeñas manos robots. En el diseño del dedo se buscó la emulación de todos sus elementos con respecto al de un dedo humano. Por otra parte, se presento el modelo dinámico del dedo llevando acabo un mapeo de los desplazamientos y las fuerzas entre el espacio articular del dedo y el espacio de los tendones. En futuros trabajos se espera expandir las experiencias conseguidas con esta plataforma de experimentación, para crear un dedo con mayor grado de libertad y planear el diseño de una mano antropomorfa bajo la consolidación de las plataformas experimentales antes creadas, así como la incorporación de técnicas de control de inspiración neurobiológicas.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo recibido por los miembros del grupo de investigación de Neurotecnología, Control y Robótica (NEUROCOR) del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena. Este trabajo fue financiado en parte por la CICYT-TIC99-0446-C02-01, y por el proyecto SYNER-AGH - BRE2-CT980797 BRITE EURAM- de Investigación Básica.

Referencias

- [1] S.C. Jacobsen, and J.E. Wood, and D.F. Knutti, and K.B. Biggers, "The Utah/MIT dextrous hand: work in progress", *The International Journal of Robotics Research*, 1988, May, vol. 3, no. 4, pp.21-50.
- [2] S.C. Jacobsen, and H. Ko, and E.K. Iversen, and C.C. Davis, "Antagonistic control of a tendon driven manipulator", *IEEE Int. Conf. on Robotics and automation*, 1989, pp. 1334-1339, Scottsdale, AZ.
- [3] M. Rosheim, *Robot Evolution: The Development of Anthrobotics*, New York: Wiley. (1994), 423 pages, Illustrated.
- [4] J.K. Salisbury, and J.J. Craig, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues", *Int. Journal of Robotics Research*, 1982, vol 1, no. 1, pp. 4-17.
- [5] Andrea Caffaz, and Giorgio Cannata, "The design and development of the DIST-Hand dextrous gripper", *IEEE Proceedings of the 1998 International Conference on Robotics and Automation*, 1998, May, vol 3, pp. 2075-2080, Belgium.
- [6] Haruki Ueno, "Artificial Intelligence: Methodology, Systems, Applications", edit. A.M. Ramsay, *Intelligent Task and Motion Scheduling for Autonomous Human-Type Service Robot Arm*, pp. 239-248, (1996), IOS Press/Ohmnscha.
- [7] P.H. Chappell and Peter J. Kyberd, "Prehensile control of a hand prosthesis by a microcontroller", *Journal Biomed. Eng.*, 1991, September, vol. 13, pp. 363-369.
- [8] A.C. van der Ham, *A dexterous teleoperator for hazardous environments*, 1997, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Department of Electrical Engineering, P.O. Box 5031, 2600 GA Delft, The Netherlands.
- [9] J. Butterfass, and G. Hirzinger, and S. Knoch, and H. Liu, "DLR's multisensory articulated hand Part I: Hardware and software architecture", *IEEE Conferenece on Robotics and Automation*, 1998, May, pp. 2081-2086, Leuven, Belgium.
- [10] H. Liu, and P. Meusel, and J. Butterfass, and G. Hirzinger, "DLR's multisensory articulated hand Part II: Parallel Torque/Position control system", *IEEE Conferenece on Robotics and Automation*, 1998, May, pp. 2087-2093, Leuven, Belgium.

- [11] Haruhisa Kawasaki, and Tsuneo Komatsu, and Suda Masanori, and Kazunao Uchiyama, "Development of an anthropomorphic robot hand driven by built-in servo-motors", *Proceeding of the 3rd International Conference on Advanced Mechatronics*, 1998, Aug, pp. 215-220, Okayama, Japan.
- [12] Jeff C. Becker and Nitish V. Thakor, "A study of the range of motion of human fingers with application to anthropomorphic designs", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 110-117, february 1988.
- [13] J.M.F. Lamdsmeer, "Study in the anatomy of articulation I. The equilibrium of the intercalated bone," *Acta. Morph Scand.*, vol.3, pp249-269, 1982.
- [14] A. Storace, " *A treatise on the biomechanics of the human finger*," Ph.D. dissertation, Polytechnic. Instit, N.Y. 19977.
- [15] G. W. Fischer, " *A treatise on the topographical anatomy of the long finger and a biomechanical investigation of its interjoint movement*," Ph.D. dissertation, Univ. Iowa, Iowa City, 1969.
- [16] Morecki, A. , Busko, Z. , Gasztold, H. and Jaworek, K. , "Synthesis and control of anthropomorphic two-handed manipulator" *Proc. 10th International Symp. On Industrial robots*, pp. 461-474, Milan, Italy, 1980.
- [17] Nakano,Y. and Hosada,Y. , "Hitachi's Robot hand" *Robotics Age*, pp. 18-20, July 1984.
- [18] Salisbury, J.K. and Craig, J. J. , "Articulated Hands: Force Control and Kinematics issues", *International Journal of Robotics Research* vol. 1, no. 1, Spring 1982, MIT Press.
- [19] Lee,J.J, (1991) "Tendon-Driven Manipulators:Analysis, Synthesis, and Control", *Thesis Report. Harvard University*.