

MANO MECÁNICA MA-I

Raúl Suárez

Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Av. Diagonal 647, planta 11, 08028 Barcelona, España, raul.suarez@upc.es

Patrick Grosch

Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Av. Diagonal 647, planta 11, 08028 Barcelona, España, patrick.grosch@upc.es

Resumen

El artículo presenta la descripción de la mano mecánica denominada MA-I (Mano Artificial Inteligente) diseñada y construida en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como parte de un sistema integrado para la experimentación y prueba de estrategias de aprehensión y manipulación de objetos. La configuración básica de la mano es de 4 dedos con 4 grados de libertad (GDL) cada uno. Se resumen las principales características de la mano, acorde con los criterios de diseño, tanto del hardware como del software, incluyendo aspectos de la parte mecánica, de la parte eléctrica y electrónica, así como del sistema de control.

Palabras Clave: Mano mecánica, Robótica, Manipulador multipropósito, Aprehensión de objetos, Manipulación de objetos.

1. INTRODUCCIÓN

Manipulador multipropósito, Efector final diestro, Mano mecánica, son distintos nombres que se utilizan para describir una herramienta mecánica que tenga una destreza considerable, potencialmente comparable con la de una mano humana desde el punto de vista de la versatilidad de movimientos.

El objetivo principal de una herramienta de este tipo es poder acoplarla a un brazo robot y con el conjunto desarrollar distintas tareas de aprehensión y manipulación de objetos con formas y tamaños diversos. Herramientas de este tipo están pensadas para realizar tareas tales como, por ejemplo, la teleoperación en ambientes riesgosos, aplicación muy importante pues evita que un humano se ponga en riesgo. Diversos centros de investigación han trabajado desde hace tiempo en el diseño de manos mecánicas, intentando buscar una buena relación entre versatilidad, complejidad mecánica, costes y facilidad de uso, entre otros aspectos afines. Una

descripción de las principales manos mecánicas presentadas en la bibliografía especializada puede encontrarse en [4]. No obstante el problema aún no está resuelto de manera general y satisfactoria y queda mucho trabajo por realizar.

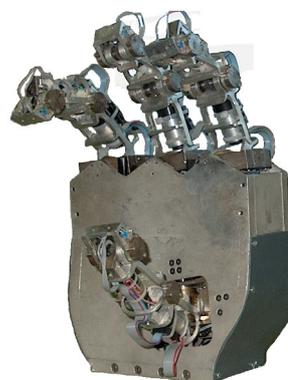


Figura 1: Foto de la construcción mecánica de MA-I.

En el IOC se está trabajando en la integración de un robot industrial con una mano mecánica y un sistema de visión artificial, de forma que acoplados permitan experimentar, probar y desarrollar teorías de aprehensión y manipulación de objetos, y en este contexto se ha desarrollado la mano MA-I. El diseño inicial de la mano mecánica y de sus componentes se llevó a cabo en el IOC en el marco de un proyecto ya finalizado [2], y actualmente se sigue trabajando en ella dentro de otro proyecto que implica tanto su puesta a punto, la inclusión de nuevos sensores y el desarrollo de estrategias de aprehensión y manipulación [3]. Aunque no es el objetivo directo del trabajo, la experiencia adquirida puede ser válida para el potencial desarrollo de prótesis para el brazo humano con capacidades superiores a las prótesis actuales.

MA-I es una mano con características antropomórficas (figura 1), tanto en relación de dimensiones como de ubicación, orientación y posibilidades de articular de los dedos. Estas características se describirán con mayor detalle en apartados posteriores.

Tras esta introducción, el artículo incluye los siguientes apartados.

- Punto de referencia: la mano humana
- Conceptos básicos de diseño
- Estructura de MA-I: Características antropomórfica y antropométrica.
- Esquema general del sistema.
- Aspectos mecánicos.
- Aspectos eléctricos y electrónicos.
- Software.
- Sistema de control.
- Incorporación de sensores en las yemas de los dedos.
- Conclusiones.

2. PUNTO DE REFERENCIA: LA MANO HUMANA

Intuitivamente, la relevancia de la mano humana como referencia de diseño de un manipulador multipropósito se basa en: a) El ser humano utiliza su mano como primer contacto con el mundo para conocerlo y desenvolverse en él; b) Los instrumentos y artefactos que el hombre diseña y que se encuentran en la vida diaria, tienen como base de diseño el concepto de que serán manipulados por una mano humana; c) La mano es el elemento más común en el que se piensa para realizar manipulación o aprehensión.

También existen razones de carácter técnico para intentar emular la eficiencia de la mano humana. La mano humana tiene un número alto de grados de libertad, alta relación fuerza /peso (incluida la fuente de energía), bajo factor de forma (compacta) y un sistema sensorial complejo. La mano humana cuenta con más de 25 GDL, que permiten múltiples configuraciones de aprehensión y manipulación con los distintos pares, tríos, cuartetos, quinteto de dedos y la palma. Cada dedo cuenta con dos articulaciones tipo bisagra (rotación en una sola dirección) y una articulación en la base con dos GDL, donde uno de los dos ejes de rotación es paralelo a los ejes de rotación de las articulaciones tipo bisagra y el segundo es perpendicular a este y normal a la palma.

En la palma se encuentran el resto de GDL, que no se mueven independientemente pero que permiten curvar la superficie donde están localizadas las bases de los dedos. El cambio de curvatura de la palma permite reubicar los planos de trabajo de cada dedo ampliando los tipos de agarres posibles y el rango de tamaño de los objetos con los que se puede interactuar. La figura 2 muestra todos los segmentos y articulaciones con que cuenta una mano, destacando la cantidad y complejidad de las articulaciones de la palma.

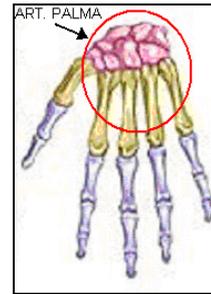


Figura 2: Articulaciones de la mano humana.

Además de la destreza que le confiere el alto número de GDL y su adecuado control, la mano humana posee un sistema sensorial que le permite determinar para un cierto objeto su dimensión, forma, orientación y posición relativa, composición, peso, conductividad térmica, textura de la superficie, fuerza ejercida, existencia o no de deslizamiento entre los dedos y el objeto, entre otras propiedades. Estas capacidades sensoriales no están limitadas a la yemas de los dedos sino distribuidas por toda la superficie de la mano ampliando las superficies de trabajo o puntos de apoyo.

La suma de todas las características mencionadas, induce a utilizar la mano humana como un punto de referencia o modelo para el desarrollo de manipuladores multipropósito.

3. CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO

El diseño de la mano mecánica se realizó en Pro-engineer, utilizando su capacidad de simulación y de análisis por elementos finitos. A continuación se describen los conceptos básicos que enmarcaron su diseño.

Modularidad.

Como concepto básico de diseño se consideró que un diseño modular del sistema era primordial. Entendiendo por modular que los elementos, tanto software como hardware, tengan fronteras y puentes de comunicación claros y que permitan el reemplazo de un módulo sin tener que intervenir en los demás. Por ejemplo, poder cambiar el algoritmo de control sin necesidad de adaptar el hardware o la interfase gráfica del sistema.

Autocontenida.

A fin de que la mano sea fácilmente acoplable y desacoplable a cualquier robot, y no se requiera de un robot de uso específico para soportarla, se ha realizado un diseño mecánicamente autocontenido, evitando la existencia de tendones o elementos de transmisión de movimiento externos a la propia mano.

Antropomorfa y relaciones antropométricas.

Se ha buscado un diseño de características antropomorfas y relaciones antropométricas por las razones expuestas en la Sección 2, pero con un factor de escala que la hace mayor que una mano humana, lo que por un lado disminuye los costes de construcción al tiempo que la hace proporcional a las dimensiones del robot existente en el IOC, un Stäubli RX-90.

4. ESTRUCTURA DE MA-I: CARACTERÍSTICAS ANTROPOMÓRFICAS Y ANTROPOMÉTRICAS

MA-I cuenta con sólo cuatro dedos en vez de los cinco de una mano humana. La reducción de un dedo se justificó al tener en cuenta que la inclusión del quinto dedo sólo incrementa un 5% las habilidades prensiles de una mano y sin embargo tenía un coste proporcionalmente mucho mayor. Otra reducción importante fue la no inclusión de los GDL con que cuenta la palma de una mano humana (ver figura 2), que permiten a la palma curvarse en torno al eje medio que pasa por la muñeca. La inclusión de estos GDL en la mano mecánica implica una elevada complejidad y coste no justificables en esta fase del trabajo. Teniendo en cuenta estas dos reducciones se detalla a continuación la estructura de MA-I.

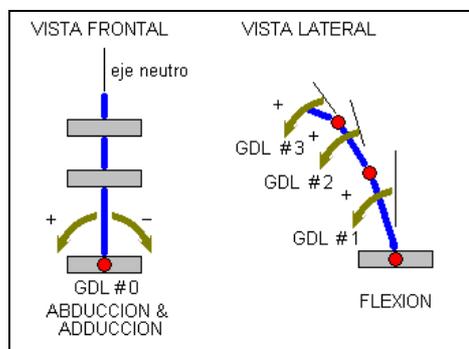


Figura 3: Esquema de las articulaciones de un dedo.

MA-I tiene cuatro dedos ubicados sobre una superficie plana (palma) (ver figuras 1 y 4). Los dedos son de dos tipos que se diferencian por las distancias entre las articulaciones, aunque la ubicación y orientación de las articulaciones son equivalentes en los cuatro dedos (al final de este apartado se da un resumen de los parámetros D-H de cada dedo). Tres de los cuatro dedos (el anular, el corazón y el índice) son iguales y tienen sus bases sobre una línea recta, alineados tal que tres de sus cuatro GDL permiten los movimientos de flexión y extensión del dedo. El GDL restante es perpendicular a la palma permitiendo los movimientos de abducción y adducción (figura 3).



Figura 4. Descripción de los dedos en MA-I con la posición "cero" de cada articulación.

El cuarto dedo (el pulgar) tiene la misma configuración que los demás, pero varían las dimensiones entre sus articulaciones así como su ubicación con respecto al plano de la mano. Es fácilmente apreciable que cuando se apoya la mano humana sobre una superficie plana se logran apoyar los cinco dedos y la palma al mismo tiempo, y también es capaz de enfrentar el pulgar con cualquiera de los restantes dedos para realizar operaciones prensiles. Para lograr estas habilidades habría que incluir GDL en la palma de la herramienta mecánica, equivalentes a las articulaciones que le dan la flexibilidad a la palma de la mano humana. En este trabajo el objetivo es crear una herramienta para la experimentación en la aprehensión y manipulación de objetos, por lo tanto lograr posiciones tales como la mano completamente apoyada sobre una superficie plana no es de interés, en cambio el poder enfrentar el pulgar con cualquiera de los otros tres dedos (índice, corazón o anular) es una necesidad. Para lograr este enfrentamiento el dedo pulgar se debe ubicar tratando de compensar en la medida de lo posible la no inclusión de los GDL de la palma. Una primera estrategia es colocar el pulgar en frente del dedo central, el corazón. Esta opción es la más pobre por la simetría de la misma, aunque esta posición permite fácilmente la interacción del pulgar con cualquiera de los otros tres dedos. Si se observa la mano humana, partiendo de la posición plana, y girando solamente el dedo pulgar hacia la palma, se aprecia que la base del pulgar se ubica en medio del corazón y el índice, y el plano de acción en el que se confina la flexión del pulgar pasa entre el meñique y el anular. Esta estrategia da una riqueza superior en diferentes tipos de agarre, comparada a la opción de enfrentar el pulgar al corazón. Para conservar esta configuración, teniendo en cuenta que la mano mecánica no tiene meñique, se ubicó la base del pulgar en medio del índice y el corazón y se ubicó el plano de acción del pulgar pasando entre el anular y el corazón. La figura 6a muestra el resultado final.

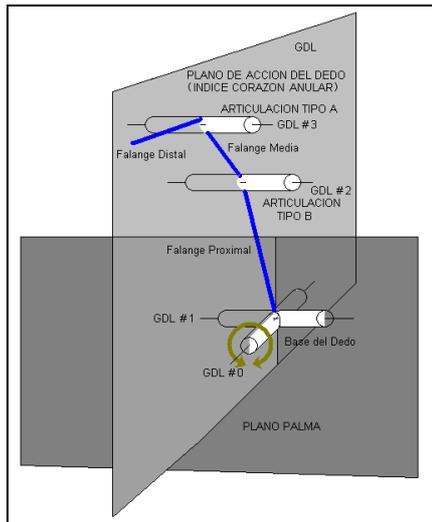


Figura 5: Orientación de los dedos Tipo II con respecto a la palma.

En general se puede considerar cada dedo como una cadena cinemática de 3 GDL (GDL #1, #2 y #3) confinada a un plano que pivota sobre un eje fijo, el GDL #0 (ver figura 5). Se debe destacar la particularidad de que los dos primeros GDL (#0 y #1), están acoplados, lo que eleva la complejidad mecánica de esta articulación, que se describe con mayor detalle en la Sección 6. En la tabla 1 se especifican los rangos de los ángulos de movimiento de cada articulación con sus equivalencias en los parámetros D-H, la posición cero de cada articulación se muestra en la figura 4.

El conjunto mano más robot se describe, en parámetros D-H, con 4 cadenas cinemáticas. Cada cadena comienza en la base del robot y termina en el extremo de un dedo. Al generar los marcos de referencia (MR) según el método D-H, el MR de la última articulación del robot sería distinta para cada cadena. Esta diferencia aumentaría el número de cálculos y dificultaría el encontrar el valor de la articulación 6 del robot, necesaria para posicionar el robot y para calcular la posición y orientación de la muñeca (unión robot-mano), siendo la posición y la orientación de la muñeca un parámetro indispensables para resolver la cinemática inversa de la mano. Para tener un MR común para la última articulación del robot se introdujo una articulación ficticia (articulación D-H #1 de la mano) que tiene su origen sobre el eje de giro de la última articulación del robot y su eje de giro de tal manera que sea colineal con el eje de giro de la última articulación del robot. Esta articulación no tiene rango de trabajo, está posicionada en un valor fijo, aunque distinto para cada dedo. Así se pudo definir un MR único en la última articulación del robot que se hace coincidir con la base común a las cuatro cadenas cinemáticas de la mano: base_mano-anular, base_mano-corazón,

base_mano-índice y base_mano-pulgar. La base_mano se definió sobre la muñeca, con su centro en la posición donde la mano y el robot se ensamblan (sistema de referencia "0" en la figura 4).

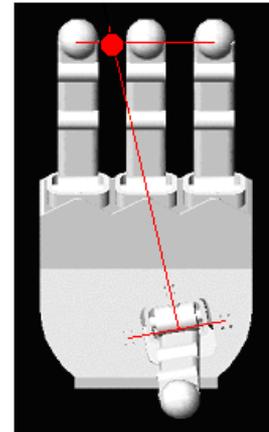


Figura 6a: Ubicación del pulgar con respecto a los otros tres dedos.

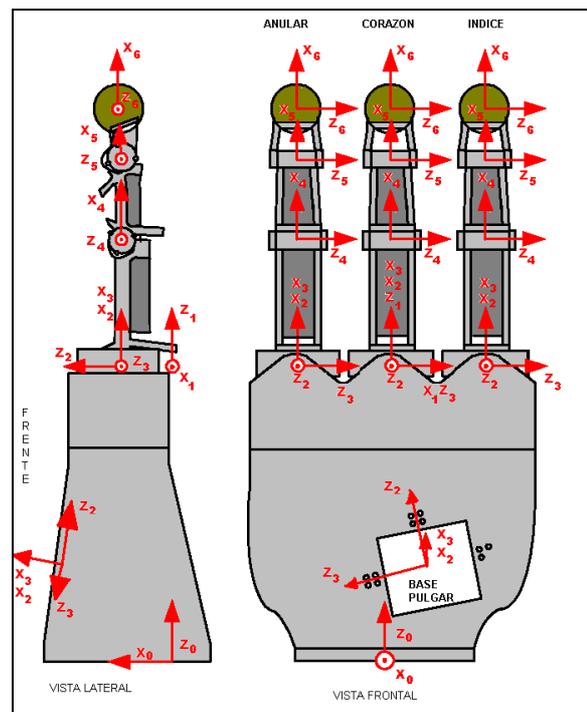


Figura 6b: Sistemas de referencia usados para obtener los parámetros D-H.

Para definir el punto de contacto de cada dedo se incluyeron en cada cadena cinemática tres articulaciones ficticias adicionales, las dos primera con sus centros en el centro de la yema del dedo, la cual se aproxima mediante una esfera. La tercera articulación ficticia es simplemente el traslado del centro de la yema hacia la superficie de la yema en la dirección definida por las otras dos articulaciones ficticias. La primera de las articulaciones permite

barrer todos los ángulos de una circunferencia que pertenece al plano de acción del dedo, la segunda permite barrer todos los ángulos de la circunferencia perpendicular al plano de acción y cuya inclinación es la definida por el ángulo anterior (ver figura 7). Las tres articulaciones ficticias permiten considerar contactos en cualquier punto de la yema del dedo. La tabla 2 contiene los parámetros D-H de MA-I, que están calculados según la metodología utilizada por Craig [1], y la figura 6b describe la posición de los sistemas de referencia utilizados.

ANGULO CONTROLADOR		ANGULO D-H	
#	RANGO	#	RANGO
BASE -ÍNDICE BASE -CORAZÓN		BASE -ANULAR	
0	0 +/-12	2	90 +/- 12
1	0 / +90	3	-7.5 / +82.5
2	+45 / +90	4	52.5 / 97.5
3	0 / +90	5	-16.65 / +73.35
BASE-PULGAR			
0	0 +/- 12	2	45.44 +/- 12
1	0 / +90	3	-7.5 / +82.5
2	+25 / +90	4	32.5 / 97.5
3	0 / +90	5	-12.73 / +77.27

Tabla 1: Rango de valores de las articulaciones y sus equivalente en los parámetros D-H.

5. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA

Los 16 GDL de la mano MA-I están accionados y controlados por 16 lazos de control independientes. Se utiliza un PC como sistema de tratamiento de información, de control y de interfase usuario-maquina. En la figura 8 se muestra el esquema general del sistema, los elementos que intervienen y las señales utilizadas en cada lazo. A continuación se detalla el funcionamiento básico del sistema.

La posición final deseada de cada dedo se introduce en el PC mediante una interfase específica para tal fin. Puede darse la posición de cada articulación o la posición deseada del extremo de cada dedo. El usuario tiene la posibilidad, por ejemplo, de almacenar posiciones y de generar ficheros con secuencias de posiciones que luego se pueden ejecutar de forma automática, asimismo, también puede ver cuando lo desee la posición actual de cada articulación de la mano y el estado de los finales de carrera. Está previsto que esta información pueda generarse de forma automática por otro computador o por otro proceso en el PC en uso. Si se ha dado la posición de los extremos de los dedos, en la versión actual implementada es necesario dar también la posición de la muñeca del robot para que utilizando la cinemática inversa de la mano se pueda determinar la posición de cada articulación.

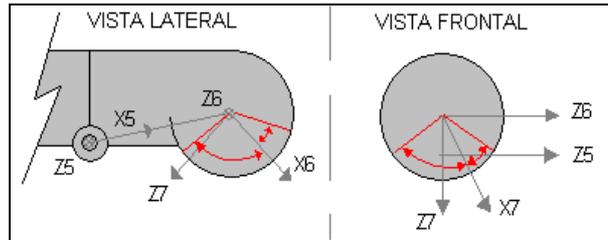


Figura 7a: Articulaciones ficticias para definir el punto de contacto sobre la yema del dedo.

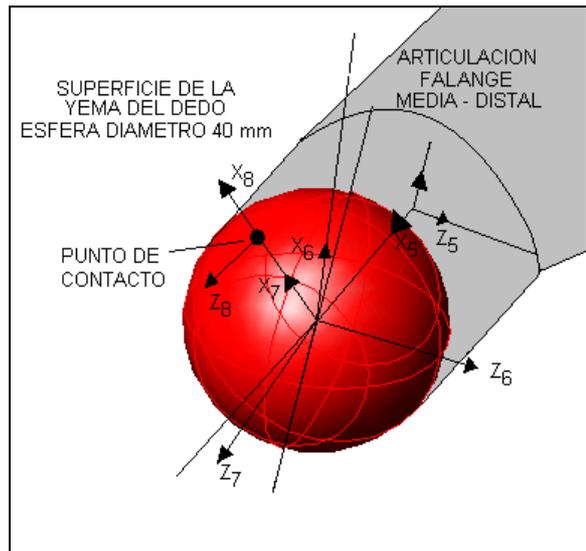


Figura 7b: Articulaciones ficticias para definir el punto de contacto sobre la yema del dedo.

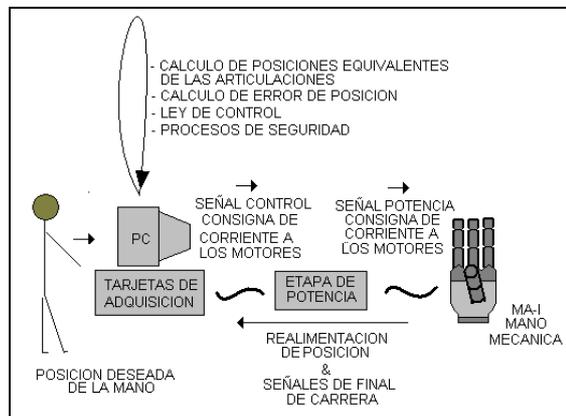


Figura 8: Configuración general del sistema.

Las consignas de cada articulación se descomponen en una serie de consignas parciales que se irán suministrando al sistema de control en cada periodo de muestreo. Esto genera un perfil de velocidad deseado (acorde a las prestaciones de cada articulación) y permite por ejemplo que todas las articulaciones concluyan su movimiento de forma coordinada.

${}^{i-1}_i T$	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
${}^0_1 T$	0	0	197.55	θ_1 90 (valor fijo)
${}^1_2 T$	-67	90	9.5	θ_2 90 +/- 12
${}^2_3 T$	0	90	0	θ_3 -7.5 / +82.5
${}^3_4 T$	76.66	0	0	θ_4 52.5 / 97.5
${}^4_5 T$	56	0	0	θ_5 -16.65 / +73.35
${}^5_6 T$	33.62	0	0	θ_6 20 / 135
${}^6_7 T$	0	-90	0	θ_7 +/- 45
${}^7_8 T$	20	0	0	θ_8 0 (valor fijo)

Tabla 2a: D-H Cadena: Base – Anular.

${}^{i-1}_i T$	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
${}^0_1 T$	0	0	197.55	θ_1 90 (valor fijo)
${}^1_2 T$	67	90	9.5	θ_2 90 +/- 12
${}^2_3 T$	0	90	0	θ_3 -7.5 / +82.5
${}^3_4 T$	76.66	0	0	θ_4 52.5 / 97.5
${}^4_5 T$	56	0	0	θ_5 -16.65 / +73.35
${}^5_6 T$	33.62	0	0	θ_6 20 / 135
${}^6_7 T$	0	-90	0	θ_7 +/- 45
${}^7_8 T$	20	0	0	θ_8 0 (valor fijo)

Tabla 2c: D-H Cadena: Base – Índice.

${}^{i-1}_i T$	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
${}^0_1 T$	0	0	197.55	θ_1 90 (valor fijo)
${}^1_2 T$	0	90	9.5	θ_2 90 +/- 12
${}^2_3 T$	0	90	0	θ_3 -7.5 / +82.5
${}^3_4 T$	76.66	0	0	θ_4 52.5 / 97.5
${}^4_5 T$	56	0	0	θ_5 -16.65 / +73.35
${}^5_6 T$	33.62	0	0	θ_6 20 / 135
${}^6_7 T$	0	-90	0	θ_7 +/- 45
${}^7_8 T$	20	0	0	θ_8 0 (valor fijo)

Tabla 2b: D-H Cadena: Base – Corazón.

${}^{i-1}_i T$	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
${}^0_1 T$	0	0	264	θ_1 -44.56 (valor fijo)
${}^1_2 T$	7.56	14.1 1	-203.32	θ_2 45.44 +/- 12
${}^2_3 T$	0	90	0	θ_3 -7.5 / +82.5
${}^3_4 T$	76.66	0	0	θ_4 +32.5 / +97.5
${}^4_5 T$	66	0	0	θ_5 -12.73 / +77.27
${}^5_6 T$	39.17	0	0	θ_6 +20 / +135
${}^6_7 T$	0	-90	0	θ_7 +/- 45
${}^7_8 T$	20	0	0	θ_8 0 (valor fijo)

Tabla 2d: D-H Cadena: Base – Pulgar.

En cada periodo de muestreo estas consignas se comparan con la posición actual de la articulación, obtenida de la señal del encoder correspondiente, y una ley de control definida por el usuario se encarga de generar el valor de la corriente para el motor. Este valor se pasa a una señal analógica de voltaje que es la entrada de la etapa de potencia, donde se genera el voltaje necesario para que fluya por los actuadores la corriente especificada. En secciones posteriores se dan más detalles del software y del sistema de control implementados.

6. ASPECTOS MECÁNICOS

MA-I es una estructura de 4 kilos de peso, sin contar los cables que salen de la mano hasta la etapa de potencia. Sus dimensiones son aproximadamente 36 cm de alto, 25 cm de ancho y 30 cm de profundidad (medidas tomadas con los dedos extendidos). La palma, como bloque central o base, está construida en fundición. Sobre la palma están ensamblados los cuatro dedos y de su anverso se desprenden las conexiones eléctricas que van hacia la etapa de control y de potencia. Los dedos son estructuras muy livianas mecanizadas en aluminio y que contienen a los actuadores de las articulaciones distal y media ensamblados sobre las falanges media y proximal como se ilustra en la figura 9.

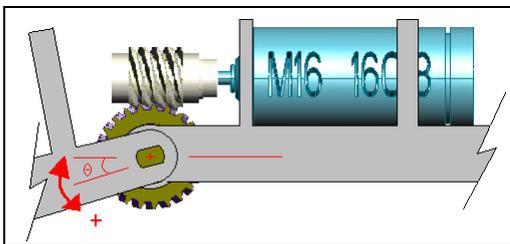


Figura 9: Detalle mecánico de las articulaciones, correspondientes a los GDL #2 y #3 (sinfin-corona).

Los 16 GDL con que cuenta la mano se dividen en articulaciones de dos tipos. Las del primer tipo son articulaciones angulares sencillas, tipo bisagra, y corresponden a los GDL #2 y #3 de cada dedo (ver figura 5), es decir las articulaciones entre las falanges proximal y media, y las falanges media y distal. La articulación está formada por un conjunto de engranajes sinfin-corona movidos por un motor-reductor DC montado en la falange anterior a la articulación, tomando como sentido de giro positivo el que “cierra” la mano (ver figura 9). La articulación es relativamente sencilla a primera vista, pero su complejidad radica en las consideraciones relacionadas con la reducción de rozamientos y huelgos; en este sentido, cada elemento debe estar soportado por rodamientos que absorban las cargas y los desplazamientos radiales y axiales, cuidando de no aumentar la fricción ni el peso del conjunto.

Las articulaciones del segundo tipo son de dos grados de libertad angulares acoplados en su centro. El acoplamiento consiste en la dependencia de la dirección del segundo eje de giro, GDL #1, de la posición angular del primer eje de giro, GDL #0, y la necesidad de que ambos ejes de giro se intersecten a 90 grados (ver figura 5). Cada dedo tiene una articulación de este tipo en su base. Esta configuración es la que le permite al dedo tener los movimiento de adducción y abducción en combinación con el movimiento de flexión y extensión de la falange proximal con respecto a la palma (figura 3).

Para diseñar esta articulación se partió de la premisa de que los motores que moverían los dos GDL deberían alojarse y fijarse sobre la palma, de lo contrario uno de los moto-reductores se movería en unisono con el GDL #0, barriendo un espacio importante. Al fijar los dos moto-reductores a la palma, la solución planteada obliga a que estos trabajen acoplados para mover las dos articulaciones. La solución adoptada es la combinación de cuatro conjuntos de engranajes que redirigen el sentido de giro a 90 grados. El primer par, los giros A, son gobernados por los moto-reductores, uno para cada conjunto. El segundo par, los giros B, reciben el giro de los primeros (ver figura 10). El primer par convierten el giro en la misma dirección y sentido, alineándose con el eje de giro del GDL #0. El segundo par reciben el giro de los primeros rotando 90 grados la dirección del giro, dando un giro resultante de igual dirección pero sentido contrario alineado con el eje del GDL #1 (ver figura 10). Los ejes de salida del conjunto de engranajes con giro B están acoplados a la estructura de la falange proximal. Si los motores giran en sentidos contrarios, el primer conjunto de engranajes, giros A, produce giros en sentido contrario, por lo tanto se anulan, y el segundo conjunto produce giros en el mismo sentido sobre el eje GDL #1, haciendo que la falange proximal gire, produciendo su flexión. La base permanecería quieta, sin movimientos de adducción ni de abducción, al recibir sobre el GDL #0 giros de sentido contrario.

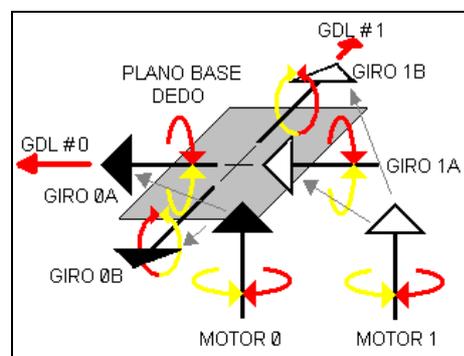
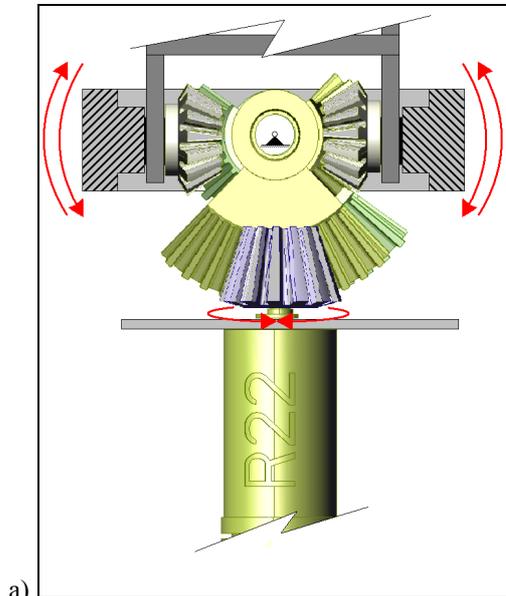
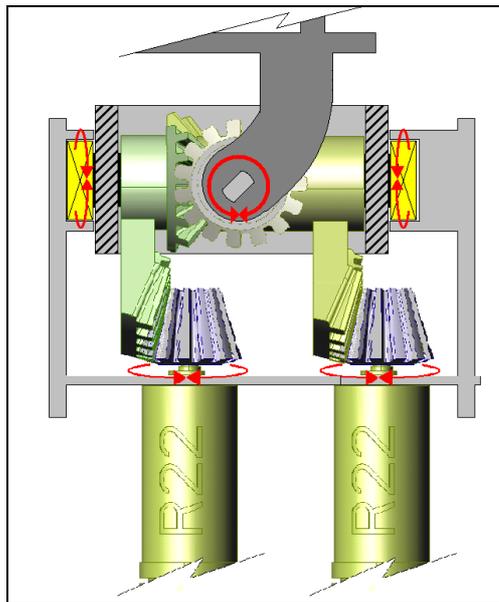


Figura 10: Esquema de la transformación de los giros de entrada de los moto-reductores.

En caso de que los motores giren en el mismo sentido, sobre el eje GDL #1 la falange proximal recibe giros de sentido contrario produciendo un giro nulo de flexión, y la base, por lo contrario, recibiría giros del mismo sentido produciendo movimientos de aducción y de abducción sobre el GDL #0.



a)



b)

Figura 11: Detalle mecánico de la articulación acoplada GDL #0 y #1; a) Vista frontal, giros de los motores en sentidos iguales producen movimientos de abducción y aducción; b) Vista Lateral, giros de los motores en sentidos contrarios producen movimientos de flexión.

En resumen, el conjunto se rige por las ecuaciones.

$$AL = (AM0/2 + AM1/2) * 13/49 \quad (1)$$

$$AF = (AM0/2 - AM1/2) * 13/49 * 27/15 \quad (2)$$

Donde AF es el ángulo de flexión-extensión, AL es el ángulo de aducción-abducción (lateral), AM0 es el ángulo que se mueve el motor 0 y AM1 es el ángulo que se mueve el motor 1. La relación de entrada/salida para el primer conjunto de engranajes es 13/49 y del segundo conjunto de engranajes es 27/15. Las figuras 11a y 11b muestran la localización de los motores y la configuración de los engranajes que producen los giros de 90 grados y los cambios de sentido de giro.

Esta configuración mecánica es un aportación importante para poder cumplir la premisa de diseño de ser una herramienta mecánicamente autocontenida, es decir, manteniendo todos los elementos, actuadores y sensores empaquetados dentro de la mano.

7. CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

El sistema eléctrico y electrónico está formado por:

- El ordenador.
- Las tarjetas de adquisición.
- La etapa de potencia.
- Conjuntos Motor-reductor-encoder.
- Los finales de carrera de cada articulación.

La distribución de estos componentes se ilustra en la figura 12.

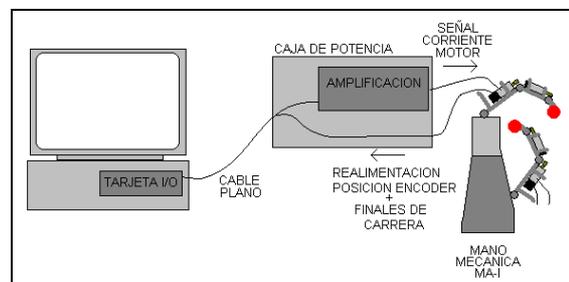


Figura 12: Distribución de los componentes eléctricos y electrónicos.

El ordenador

Es un PC Pentium III a 700 MHz y con 128 M RAM. Se utiliza como interfase con el usuario, para procesar la información y como controlador digital. Tiene las tarjetas de adquisición y control instaladas en los puertos PCI, recibiendo las señales de posición de motores y entregando las señales de corriente de los motores a la etapa de potencia. Su sistema operativo es QNX.

Las tarjetas de adquisición y control.

Son cuatro tarjetas MFIO-4A I/O de la firma Precision Micro Dynamics Inc (PMDI) preparadas para trabajar sobre plataformas de tiempo real. Cada

tarjeta recibe las señales de un dedo completo y controla todos sus actuadores, incluyendo:

- Ocho señales digitales de los finales de carrera, dos por articulación indicando sus posiciones máxima y mínima.
- Cuatro entradas para encoders incrementales, de dos canales en cuadratura.
- Cuatro señales analógicas de salida, entre +10 y -10 voltios, como señal de acción para los cuatro motores de cada dedo. Cada señal indica la corriente que debe fluir por el motor correspondiente.

Etapa de Potencia

Equipo completamente diseñado y construido en el IOC, es el responsable de:

- Concentrar todas las señales, que van o vienen de la mano, en ocho cables planos de 60 hilos. Los 8 cables planos van hacia las tarjetas de adquisición instaladas en el ordenador.
- Transformar la señal de acción de cada motor, voltaje entre +10 y -10 voltios, en la corriente equivalente responsable de mover los motores.
- Limitar la corriente de los motores al valor máximo de corriente de trabajo recomendado por el fabricante.

El sistema tiene un consumo máximo de 3 amperios por dedo cuando todos los motores giran a su régimen máximo.

Conjuntos motor-reductor-encoder

Son moto-reductores de corriente continua, uno por cada GDL. Cada uno cuenta con un encoder instalado en el eje del motor, por lo que la posición de la articulación se mide indirectamente, como función de la relación del reductor y de los engranajes de la articulación.

Finales de carrera

Los finales de carrera son una protección adicional para los motores y para los engranajes. Están diseñados para que corten el suministro de corriente a los motores al llegar a uno de los extremos de la articulación evitando que esta se fuerce. El corte de corriente se hace por software utilizando interrupciones en las tarjetas de adquisición de datos. La interrupción dispara rutinas que colocan el valor de la corriente del motor indicado en cero. Además de para proteger el sistema, los finales de carrera se utilizan para calibrar los valores de posición de cada articulación. Dentro del software desarrollado se incluye la opción de inicialización, al ejecutarla los motores giran en un sentido determinado hasta que llegan a activar los finales de carrera. En ese instante se colocan los valores iniciales de posición en los respectivos registros y sirven de referencia para los movimientos posteriores.

8. SOFTWARE

La modularidad es la principal premisa de diseño del software que se ha implementado, dada las necesidades de variar, quitar o agregar elementos que intercambian o comparten información. Además, el controlador debe ser capaz de responder a cada una de las 16 articulaciones en el periodo de muestreo seleccionado, sin importar qué otra tarea se esté realizando. Esta condición llevó a utilizar un sistema operativo de tiempo real (RTS - real time systems), escogiéndose el sistema operativo QNX por cuestiones de compatibilidad con otros elementos existentes en el laboratorio y utilizados para comandar el robot en que se monta la mano. La figura 13 muestra un esquema de la interrelación de los módulos de software diseñados para el control e interacción con el usuario.

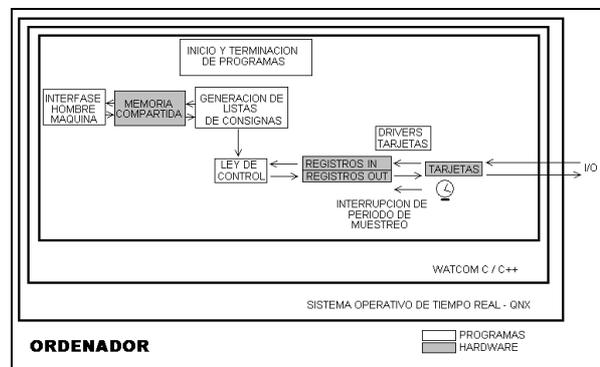


Figura 13: Esquema General del Software.

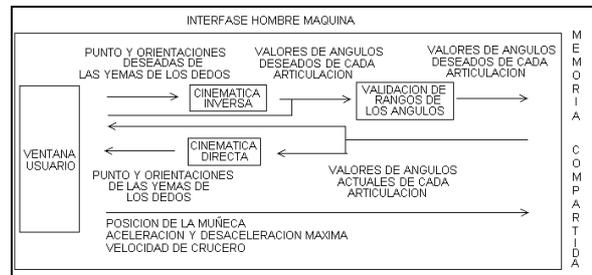


Figura 14: Interfase hombre-maquina.

La Interfase hombre-maquina permite al operador mover la mano mediante el uso de ventanas con distintas opciones. Las acciones más comunes son: introducir la posición de cada GDL o incrementarla en un ángulo dado, o introducir la posición y orientación final de la yema de los dedos. La figura 14 muestra las opciones y el intercambio de información entre la interfase con el usuario y el módulo de planificación de bajo nivel y el control.

El módulo de planificación de bajo nivel es el encargado de diseñar el perfil de posiciones que debe seguir en el tiempo cada articulación, con el fin de

que todas las articulaciones comiencen y terminen simultáneamente. Esto se logra generando una lista FIFO de consignas de posición, la cual se va descargando periodo a periodo en la entrada de cada lazo de control. El primer paso para generar las listas es encontrar el mayor de los tiempos requeridos por las articulaciones para realizar el movimiento entre la posición final deseada y la respectiva posición actual. Los cálculos se realizan considerando una aceleración constante, una desaceleración constante y una velocidad de cruceo máxima, todas ellas dadas por el usuario. Encontrado el tiempo máximo, se modifican los perfiles de las demás articulaciones reduciendo la velocidad de cruceo de cada perfil, para que todas las articulaciones tarden el mismo tiempo en concluir su movimiento. La figura 15 ilustra esta modificación de perfiles, mostrándose también los valores que se utilizan para generar la lista de consignas, (... P_{i-1} , P_i , P_{i+1} , P_{i+2} ...), para el controlador.

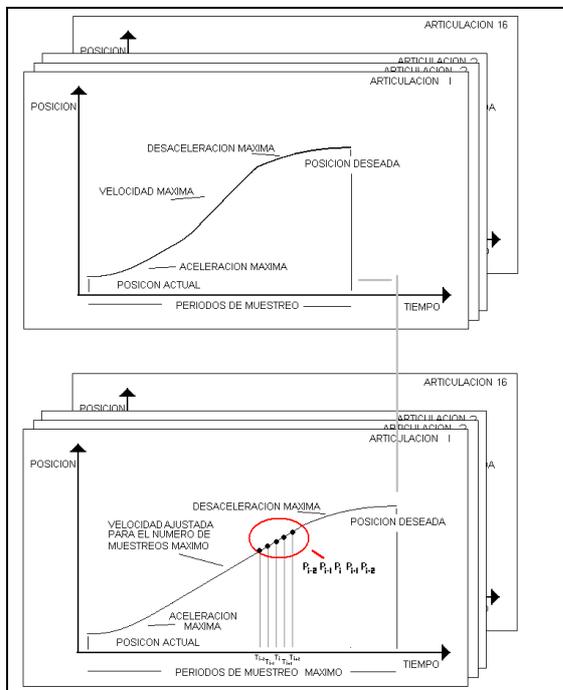


Figura 15: Cambio de perfil de posiciones en el tiempo para asegurar que todas las articulaciones se muevan coordinadamente.

9. SISTEMA DE CONTROL

El control del sistema es un conjunto de 16 lazos independientes, uno para cada articulación. Para su diseño se desarrolló un modelo de la planta, a partir del cual se realizó el diseño del controlador. Dado el conocimiento de las características del sistema (catálogos del fabricante de los motores DC y reductores, especificaciones de las tarjetas de potencia, y parámetros de la estructura mecánica) y

de su disponibilidad física se planteó un modelo teórico del sistema y luego se ajustó experimentalmente. El modelo incluye una serie de no linealidades debidas principalmente a la saturación de amplificadores operacionales en la etapa de potencia y a la fricción seca en la rodadura de los motores y las reducciones. La figura 16 ilustra el modelo del sistema implementado en MATLAB.

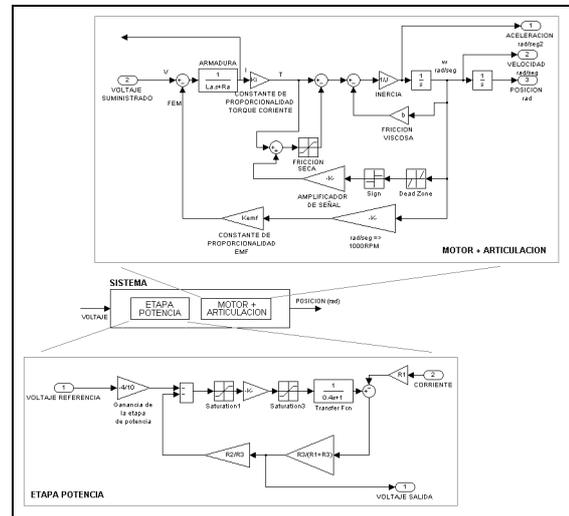


Figura 16: Modelo de la planta utilizado para simulaciones y diseño del controlador

La figura 17 ilustra gráficamente la velocidad (grad/s) vs. tiempo (s) resultante de 10 pruebas físicas obtenidas al aplicar entradas escalón de distintos valores de voltaje a la articulación distal del dedo índice. El valor de voltaje de la entrada escalón se aumentaba 1 voltio en cada prueba. Puede apreciarse que a partir de 7 voltios hay una saturación en la velocidad máxima que alcanza la articulación.

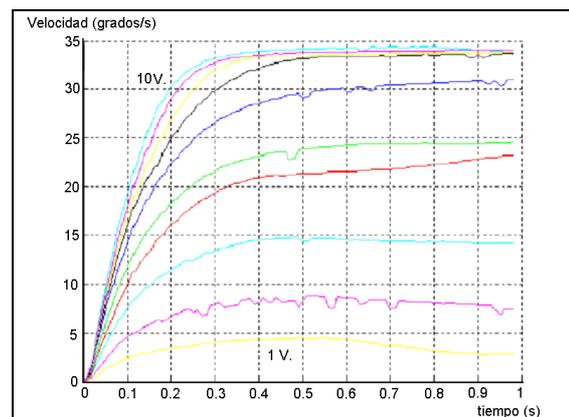


Figura 17: Gráfico de velocidad (grad/s) vs. tiempo (s) de los resultados experimentales al aplicar distintos valores de voltaje a la articulación distal del dedo índice.

En el gráfico de la figura 18 se muestran los resultados de la misma prueba pero esta vez realizada mediante simulación en ordenador utilizando el modelo obtenido de la planta. Puede apreciarse la similitud de resultados lograda.

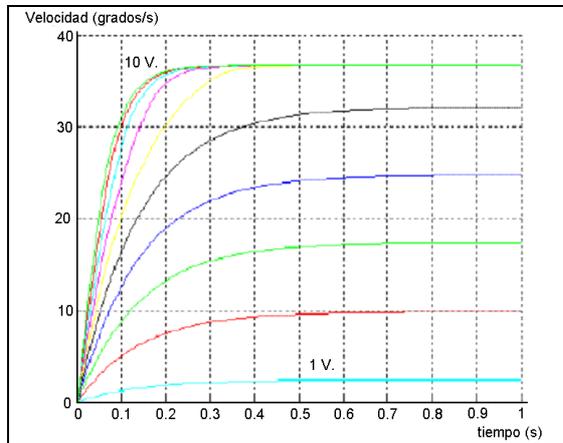


Figura 18: Gráfico de velocidad (grad/s) vs. tiempo (s) obtenidos en simulación con el modelo de la articulación distal del dedo índice aplicando distintos valores de voltaje.

A fin de trabajar con un modelo mas sencillo, a partir del modelo no lineal se obtuvo un modelo lineal. Para ello se consideraron condiciones de máxima aceleración y velocidad en los perfiles de movimiento introducidos por el usuario, de manera que pueda asegurarse que los amplificadores operacionales no se saturan. Para minimizar el efecto en el modelo lineal de la no linealidad introducida por la fricción seca se aumenta la acción de control en un valor de voltaje suficiente para vencerla, en cualquiera de los dos sentidos de giro. Con las consideraciones anteriores, el modelo lineal es válido y se utilizó para realizar el diseño de un control PD. El esquema de control diseñado se muestra en la figura 19, se incluye la lista FIFO de consignas que asegura que se siguen perfiles de posición que aseguran la no saturación de los amplificadores. En la tabla 3 se listan los valores de las constantes utilizadas en el controlador PD del motor de cada articulación.

MOTOR CONSTANTES	M0 y M1	M2	M3
Kp	18	0.4	2.1
Kd	2.5	0.1	0.5

Tabla 3: Constantes utilizadas en el controlador para cada caso de articulación.

El lazo de control tiene un periodo de muestreo de 1 ms y la realimentación de la posición de la articulación se realiza indirectamente, ya que se

mide la posición del motor y no la real de la articulación. La figura 20 muestra el resultado de aplicarle al sistema en lazo cerrado de la articulación distal del dedo índice una señal escalón de 30 grados. La respuesta es correcta, ya que esta consigna es una exigencia poco probable en la práctica donde se utilizan perfiles de velocidad como el mostrado en la figura 15.

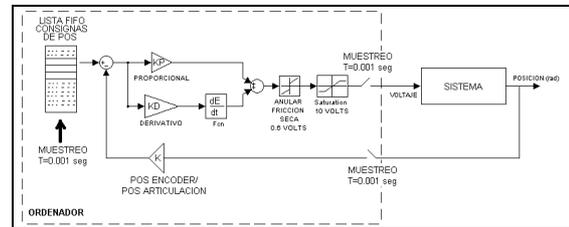


Figura 19: Esquema de control utilizado en cada articulación.

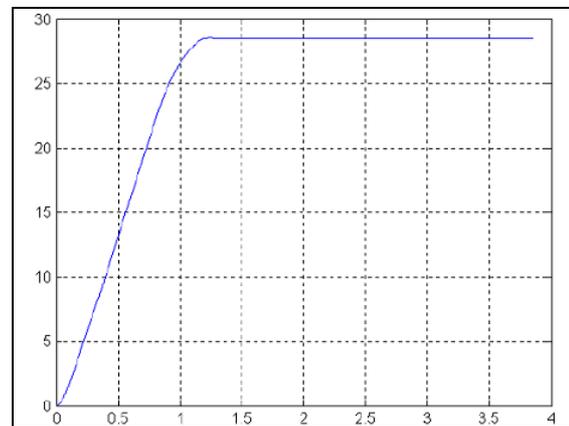


Figura 20: Gráfico posición (grad) vs. tiempo (t), del comportamiento de la articulación distal del dedo índice en lazo cerrado a una entrada escalón de 30 grados.

10. INCORPORACIÓN DE SENSORES EN LAS YEMAS DE LOS DEDOS.

El diseño de la mano contempla que las puntas de los dedos sean intercambiables sobre la falange distal, facilitando el uso de yemas de diferentes características según convenga (diferentes materiales, formas y tamaños) o con distintos tipos de sensores. Actualmente se está trabajando en el diseño y construcción de yemas provistas de sensores de fuerza. Estas yemas son esféricas (40 mm de diámetro), de silicona montada sobre un alma metálica. La silicona cumple la función de aumentar la superficie útil de contacto (con un coeficiente de fricción aceptable) que propaga las fuerzas de presión hacia el sensor mientras absorbe los errores de posición relativa que pudieran existir entre el dedo y la superficie de contacto. Al mismo tiempo también

sirve como protección del propio sensor. La figura 21 ilustra el diseño realizado. La forma esférica de la yema facilita el cálculo de una solución de la cinemática inversa de los dedos (la posición de los ángulos de las articulaciones) cuando se dan puntos de contacto para cada dedo sobre un objeto; esto es debido a que el punto de contacto sobre el dedo puede ser cualquiera sobre un casquete esférico, que se describe simplemente mediante dos grados de libertad ficticios en el extremo del dedo (dos ángulos que fijan cada punto de la esfera con respecto a un punto fijo de la falange distal). La puesta en marcha de estas yemas permitirá aumentar las prestaciones de la mano ya que podría realizarse un control de la presión que cada dedo ejerce sobre un objeto. Este es un trabajo futuro, que requiere nuevos módulos de software para llevar a cabo estrategias de control de fuerza y para especificar acciones de aprehensión que contemplen consignas de posición y de fuerza.

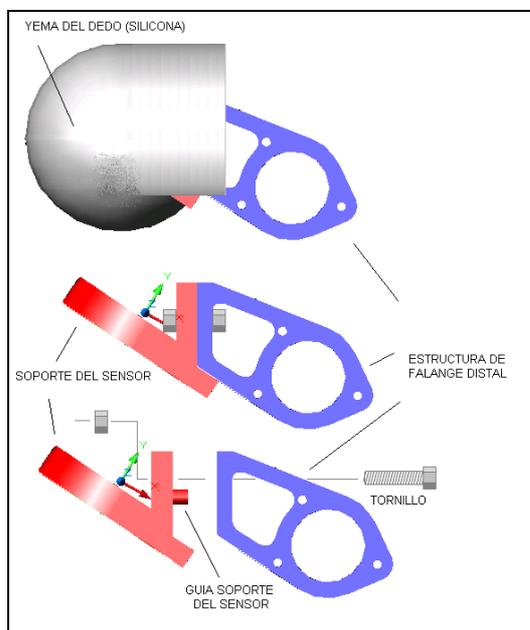


Figura 21: Yema del dedo y su sujeción.

11. CONCLUSIONES.

En este artículo se ha presentado la mano mecánica MA-I (figura 22 y 23) diseñada y construida en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales de la UPC. Se ha realizado una breve descripción de los objetivos perseguido en su diseño, y de los detalles más relevantes de su estructura física, de la parte mecánica, de la parte eléctrica y electrónica, del software desarrollado para su manejo así como del sistema de control. Como características principales cabe destacar:

- Antropomorfa, con 4 dedos de 4 GDL cada uno.
- Mecánicamente autocontenida, fácil de montar y desmontar en un robot industrial.

- Modular, tanto el hardware como el software, lo que facilita la adición, modificación, ampliación o reemplazo de partes.
- Sistema de control e interfase de usuario implementada en un PC con sistema operativo de tiempo real QNX.
- Sistema de control abierto, se pueden ensayar distintas estrategias de control.
- Posibilidad de incluirle nuevos sensores.
- Puntas de los dedos intercambiables.

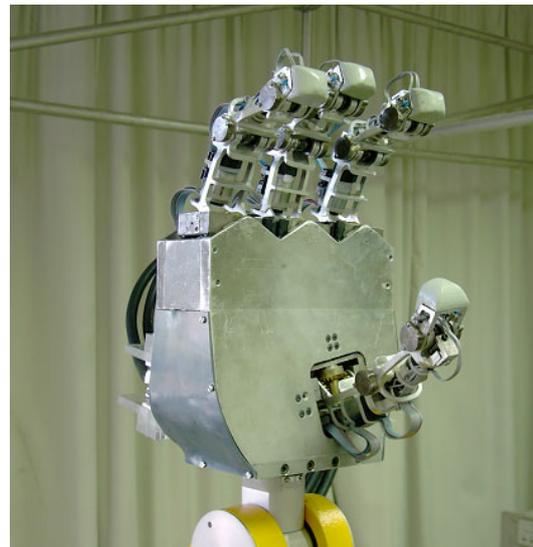


Figura 22: Foto de la mano MA-I.



Figura 23: Foto de la mano MA-I instalada en un robot industrial.

Agradecimientos

El desarrollo de MA-I se realizó en el seno de la línea de robótica del Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales de la UPC, con la colaboración de numerosas personas en distintas etapas y aspectos del trabajo. Entre el personal de investigación debe destacarse particularmente a Luis Basañez, Jan Rosell, Ramón Costa y José Fernández. En el diseño y construcción de la electrónica de potencia se agradece la colaboración de Rafael Cardoner y Enric Miró. También cabe mencionar la colaboración de algunos estudiantes, Ángel Mora y Sergi Domene hace varios años cuando todo era una idea, y Roger Gallart y Manuel Ardila muy recientemente cuando MA-I ya es una realidad.

Finalmente agradecer a la CICYT, que mediante sus proyectos TAP98-0471 (1998-2001) y los proyectos en curso DPI2001-2202 y DPI2002-03540 ha sido la principal fuente de financiación para el desarrollo de MA-I.

Referencias

- [1] Craig John J., (1986) "Introduction to Robotics mechanics and control" Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [2] "Diseño y construcción de una mano mecánica con capacidad de manipulación", Proyecto CICYT TAP98-0471 (1998-2001), Investigador principal R. Suárez, Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales – Universidad Politécnica de Cataluña, IOC-UPC.
- [3] "Manipulación diestra semiautónoma y teleoperada para robótica industrial y de servicios" Proyecto CICYT DPI 2001-2202 (2001-2004), Investigador principal R. Suárez, Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales – Universidad Politécnica de Cataluña, IOC-UPC.
- [4] Suárez R., Prado R. (2001) "Manos mecánicas: resumen y análisis de diferentes propuestas" Documento Técnico IOC-DT-I-2001-02: Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales – Universidad Politécnica de Cataluña, IOC-UPC.