

# ESTUDIO Y DESARROLLO DE PRIMITIVAS MOTORAS PARA MANIPULACIÓN CON MANOS ROBÓTICAS ANTROPOMORFAS

A. Martínez Ramírez, J. Molina Vilaplana, F. García Córdova, J.J Feliu Batlle, J. López Coronado  
[A.Mtnez@upct.es](mailto:A.Mtnez@upct.es), [Javi.Molina@upct.es](mailto:Javi.Molina@upct.es), [Francisco.Garcia@upct.es](mailto:Francisco.Garcia@upct.es), [Jorge.Feliu@upct.es](mailto:Jorge.Feliu@upct.es),  
[JL.Coronado@upct.es](mailto:JL.Coronado@upct.es).

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Politécnica de Cartagena.  
Campus Muralla del Mar. C/ Doctor Fleming S/N 30202. Cartagena. Murcia. Spain.

## Resumen

*En la última década se ha construido un considerable número de manos robóticas antropomorfas. Sin embargo, muy pocos estudios se han llevado a cabo en relación con la destreza o habilidad de dichas manos. En este trabajo se presentan una serie de estudios relacionados con la manipulación de precisión por parte de manos robóticas antropomorfas. Se entiende manipulación de precisión al control cinemático de la posición del objeto agarrado, utilizando únicamente los contactos de las puntas de los dedos con el objeto. La aproximación utilizada, define un conjunto de primitivas de manipulación básicas que la mano puede llevar a cabo. Estas funciones primitivas son flexibles ya que incluyen una serie de parámetros asociados a la geometría y tamaño de los objetos a manipular y además, permiten su implementación partiendo de distintas topologías de agarre iniciales. En este trabajo también se describe como estas primitivas se pueden emplear de forma secuencial para dar lugar a tareas de manipulación más complejas. Los estudios se han realizado sobre una mano robótica antropomorfa virtual, diseñada con técnicas CAD descritas en el artículo.*

**Palabras Clave:** manos robóticas antropomorfas, manipulación de precisión, primitivas motoras, control motor, CAD.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un número considerable de manos robot ha sido construido en la década pasada. Los puntos de aplicación principal de estas manos han sido las prótesis [1], manipulación en entornos agresivos [9] y la manufactura flexible [6]. Aunque su implantación industrial no ha sido muy extensa, si que han producido un incremento importante en la investigación relacionada con los agarres y la

manipulación de precisión. En este trabajo se estudia la manipulación de precisión, que trata con movimientos de las puntas de los dedos exclusivamente. Para ello se ha definido un conjunto de primitivas de manipulación básicas. Las primitivas pueden combinarse para dar lugar a tareas de manipulación complejas. Existen varias razones para utilizar funciones elementales de manipulación. Primeramente, la planificación de tareas se simplifica utilizando módulos predefinidos. Partiendo de la existencia de un planificador de alto nivel (sistema de inferencia difuso, redes neuronales...), una vez que este sistema decide qué movimiento es el que debe llevarse a cabo (por ejemplo, rotar el objeto alrededor de determinado eje), se consulta una lista de posibles acciones ejemplificada por nuestro conjunto de primitivas gesturales. La función primitiva se particulariza para la tarea a realizar a través de parámetros que especifican la topología inicial del agarre y el tamaño del objeto. Dicha configuración inicial y las trayectorias aproximadas de las puntas de los dedos son parte de las funciones primitivas. Una segunda razón para utilizar primitivas motoras es que en realidad, existe un número finito de movimientos que una mano puede llevar a cabo. Campbell [5] ha establecido 58 movimientos básicos para la mano humana. La diversidad de movimientos observada es más aparente que real, de hecho, según algunos estudios sobre posturas de agarre de objetos [11], unas pocas sinergias posturales (movimientos básicos y sinérgicos de la mano) pueden reproducir el continuo de gestos observados durante la aprehensión de una amplia gama de objetos con los que se trabaja en tareas del día a día.

Varios investigadores han estudiado la estrategia de manipulación de precisión basándose en el paradigma de primitivas motoras. Speeter [12] implementó un conjunto de primitivas de manipulación en la mano Utah- MIT [9]. En su sistema se almacenaban los valores de la posición

de las articulaciones para un conjunto simple de movimientos de la mano que se empleaban para llevar a cabo operaciones sencillas, tales como rotar un objeto cierto ángulo. En ese trabajo desarrolló el lenguaje HPL (“Hand Programming Language”) en el cual las primitivas podían ser empleadas secuencialmente en una máquina de estados finitos. En el trabajo de Speeter [12], los movimientos de la mano están definidos a través de desplazamientos angulares. Dicho de otra manera, una primitiva está definida a través de una serie de desplazamientos angulares.

En este trabajo, se sigue una línea apuntada por Michelman [10] en la que se adopta un concepto ampliado de primitiva de manipulación. El estudio del control motor en primates superiores sugiere que la planificación de trayectorias se hace en coordenadas espaciales, respecto a un sistema de referencia general y no en coordenadas de configuración de las articulaciones. Georgopoulos y colaboradores [8] encontraron poblaciones neuronales en el córtex motor que codifican la dirección del movimiento a realizar en coordenadas espaciales. Modelos como el DIRECT [4] sobre formación de trayectorias balísticas en primates tienen en cuenta este hecho. Especificar movimientos únicamente como desplazamientos de articulaciones hace caso omiso de estos hallazgos completamente. Lo que no parece discutible es que a bajo nivel el sistema nervioso codifique los movimientos como incrementos articulares, pero esto, en última instancia es una transformación continua y adaptativa de los comandos motores superiores, codificados en el sistema de referencia espacial cartesiano. En este trabajo, y acorde a estos hechos, los movimientos se especifican según el desplazamiento o rotación que se desea imprimir al objeto manipulado. La implementación de estos movimientos (el paso de trayectorias planificadas a incrementos articulares) se lleva a cabo aplicando cinemática inversa. La ventaja de esta aproximación es que nos permite describir las tareas de manipulación de la mano respecto a un sistema de coordenadas cartesiano y global.

El artículo está organizado de la siguiente manera: En el apartado 2 se describen en detalle las primitivas de manipulación desarrolladas. En el apartado 3 se describen las técnicas CAD con las que se ha desarrollado la mano robótica antropomorfa virtual sobre la que se ha llevado a cabo la implantación de las primitivas motoras. En el apartado 4 se presentan los resultados de las experiencias de esa implantación. Por último, en el apartado 5 se enumeran las conclusiones de este trabajo y la proyección futura del mismo.

## 2. PRIMITIVAS MOTORAS

Teniendo en cuenta los hechos expuestos en el apartado anterior, hemos diseñado el conjunto de primitivas de manipulación sobre la base de las siguientes hipótesis:

- 1) Los movimientos de los dedos son los que provocan el movimiento del objeto.
- 2) Los movimientos se realizan a una velocidad lo suficientemente baja para que una aproximación cuasi estática sea lo suficientemente válida.
- 3) Los objetos poseen superficies no deslizantes, son rígidos y los puntos de contacto con los dedos no varían durante la ejecución del movimiento.
- 4) En este trabajo solo se tienen en cuenta los aspectos cinemáticos de la tarea, por lo que en las primitivas no se hacen especificaciones sobre las fuerzas involucradas en los procesos.

Cada primitiva motora de manipulación representa una traslación o una rotación de un objeto con sección circular o rectangular. Para llevar a cabo traslaciones y rotaciones arbitrarias, las funciones primitivas pueden ser combinadas entre sí o secuenciadas. Además, las funciones primitivas poseen parámetros que nos permiten controlar la cantidad de rotación o traslación requerida, condiciones iniciales de agarre, y condiciones de finalización. Tres tipos de traslación y cuatro tipos de rotación se han desarrollado en este trabajo. Las consideraciones que se han hecho a la hora de implementar el conjunto de primitivas propuesto son las siguientes[10]:

*Configuración inicial de agarre.* Consiste en el agarre inicial del objeto, es decir, el conjunto de dedos que participan en el agarre y su posición y localización respecto al objeto a manipular. En este punto, el conjunto de primitivas diseñado muestra una gran versatilidad y flexibilidad ya que una misma primitiva puede ser inicializada con distintas configuraciones de agarre.

*Trayectorias de los dedos.* Cuando el movimiento del objeto se especifica, el conjunto de primitivas de manipulación nos permite calcular las trayectorias aproximadas de las puntas de los dedos que contactan con el objeto. Por ejemplo, si se pretende desplazar un objeto en una dirección paralela a un vector  $u$ , los puntos de contacto de los dedos deberán seguir trayectorias paralelas a  $u$ ,

independientemente del tamaño del objeto a trasladar.

*Análisis del espacio de trabajo.* Dependiendo del tamaño del objeto y de la posición y configuración de agarre inicial, para una primitiva dada, es solamente posible un conjunto finito de trayectorias (espacio de trabajo). Es importante conocer los espacios de trabajo para cada primitiva actuando sobre objetos de distinto tamaño ya que a la hora de concatenar manipulaciones, el espacio neto de trabajo accesible a la secuencia completa será la intersección de los espacios de trabajo asociados a cada tarea independientemente.

Resumiendo, a la hora de implementar cada una de las manipulaciones básicas propuestas en este trabajo, han de seguirse los siguientes puntos: (1) Selección de la primitiva adecuada al movimiento requerido. (2) Selección de una topología de agarre inicial. (3) Cálculo de las trayectorias de los contactos digitales con el objeto en el sistema de referencia de la mano. (4) Cálculo de la cinemática inversa que convierte trayectorias en el espacio Cartesiano en incrementos angulares en las articulaciones que permiten la generación de la trayectoria planificada.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA MANO

Se ha diseñado una mano robótica genérica con el programa de diseño 3D-Studio v.4.0. La mano consta de una palma y 4 dedos, cada uno de ellos constituido por 3 articulaciones de 1 GDL (Flexión / Extensión) excepto la de la base con 2 GDL (Abducción y Flexión / Extensión). La mano se ha diseñado empleando cadenas cinemáticas para cada dedo, con un resolvidor de cinemática inversa en la punta, tal que, moviendo este elemento se consigue un adecuado movimiento para las demás articulaciones del dedo.

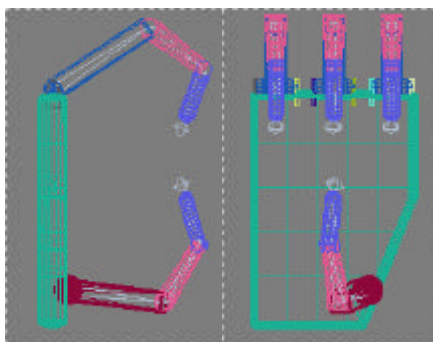


Figura 1: Mano antropomórfica diseñada

Los dedos índice, medio y anular son idénticos y se ha tomado como referencia las dimensiones del

dedo índice en seres humanos, siendo éstas las siguientes (en mm) [2],[3],[7]:

Longitud de la falange distal	→	19.95
Longitud de la falange media	→	24.68
Longitud de la falange proximal	→	43.58
Espesor de la articulación DIP	→	5.57
Espesor de la articulación PIP	→	7.56
Espesor de la articulación MCP	→	5.57

Para el dedo pulgar se ha tomado como base las dimensiones del anterior pero reducidas a una escala del 90%.

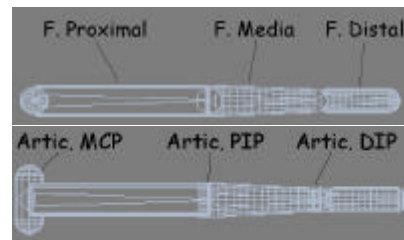


Figura 2: Articulaciones y falanges de un dedo integrante de la mano virtual diseñada.

Tomando como punto de partida los datos de un dedo índice humano, los rangos de movimiento para las distintas articulaciones de la mano virtual son [2],[3]:

#### Índice, Medio, Anular

- Articulación DIP → Flexión (90°) / Extensión (6°)
- Articulación PIP → Flexión (90°) / Extensión (11°)
- Articulación MCP → Flexión (90°) / Extensión (13°)
- Articulación MCP → Abducción (30° / -30°)

#### Pulgar

- Articulación. DIP → Flexión (55°) / Extensión (10°)
- Articulación. PIP → Flexión (80°) / Extensión (15°)
- Articulación MCP → Flexión (80°) / Extensión (20°)
- Articulación MCP → Abducción. (60° / -60°)



Figura 3: Aspecto de la mano CAD empleada en la implementación de las primitivas motoras.

## 4. RESULTADOS

Se han llevado a cabo una serie de experiencias con el objeto de determinar el espacio de trabajo abarcable por la mano para cada tipo de manipulación. Se han realizado ensayos de Traslación y Rotación sobre los 3 ejes (x,y,z), con un objeto rectangular prismático, variando como parámetro la posición inicial de la punta del pulgar. También se ha incluido un ensayo, denominado Tip-Roll, consistente en la rotación de un objeto cilíndrico mediante dos dedos.

### 4.1 ENSAYOS DE TRANSLACIÓN EN EL EJE X CON ROTACIÓN SOBRE LOS 3 EJES

El objeto empleado en las experiencias es un prisma de tamaño 25 x 25 x 100mm. Durante los ensayos se trasladada el prisma en la dirección x (en los dos sentidos), haciendo un barrido sobre distintas posiciones iniciales del pulgar mientras se observa el máximo giro en grados permitido para los tres ejes. Las rotaciones en torno al eje X para traslaciones del prisma sobre el mismo eje, alcanzan valores prácticamente constantes, independientemente de la posición del prisma y del pulgar, excepto para máxima traslación del prisma y del pulgar, donde los valores se reducen. Las curvas de giros en Y para traslaciones en X se muestran en la Figura 4 y presentan una característica de campana, con un máximo que se alcanza cuando el prisma se encuentra en posiciones cercanas a la mitad de la traslación total.

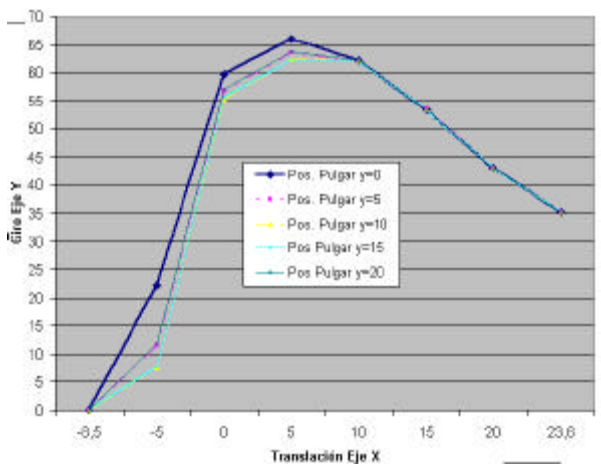


Figura 4: Giros en Y vs traslaciones en X

La curva de rotaciones en el eje Z que se puede ver en la figura 5 adopta también forma de campana, pero esta vez con una zona central de máximos

más aplanada, que se reduce al ir trasladando el pulgar.

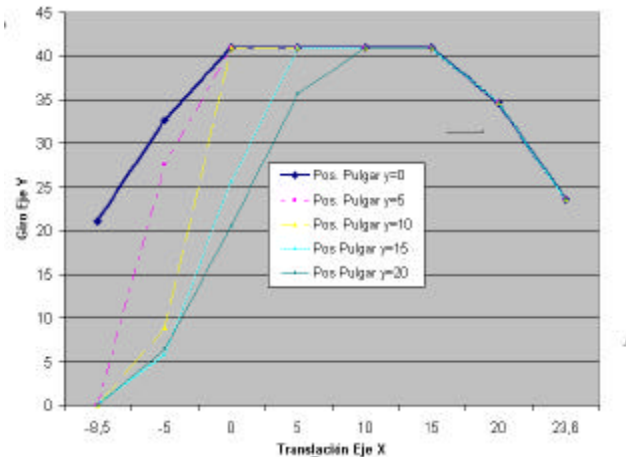


Figura 5: Giros en Z vs traslaciones en X

### 4.2 ENSAYOS DE TRANSLACIÓN EN EL EJE Y y Z CON ROTACIÓN SOBRE LOS 3 EJES

En este apartado se presentan los resultados más significativos de ensayos similares a los anteriores pero variando los ejes sobre los cuales se ejerce una traslación del objeto manipulado. En la Figura 6 se muestra el giro posible sobre el eje Z frente a la traslación del objeto en el eje Y. En la Figura 7 se muestra el giro posible sobre el eje X frente a la traslación del objeto en la dirección del eje Z. En la Figura 8 se muestra el giro posible sobre el eje Y frente a la traslación del objeto en el eje Z.

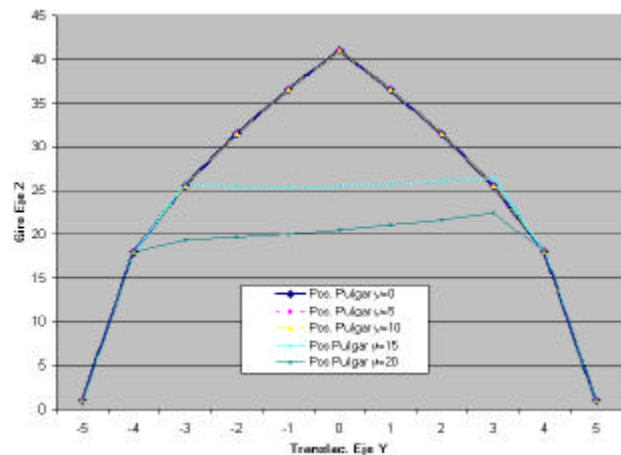


Figura 6: Giros en Z vs traslaciones en Y

En la figura 6 se observa un efecto de reducción en la capacidad de giro conforme el pulgar se desplaza desde la posición inicial de oposición al dedo medio

que hemos elegido como posición de referencia inicial para todas las experiencias.

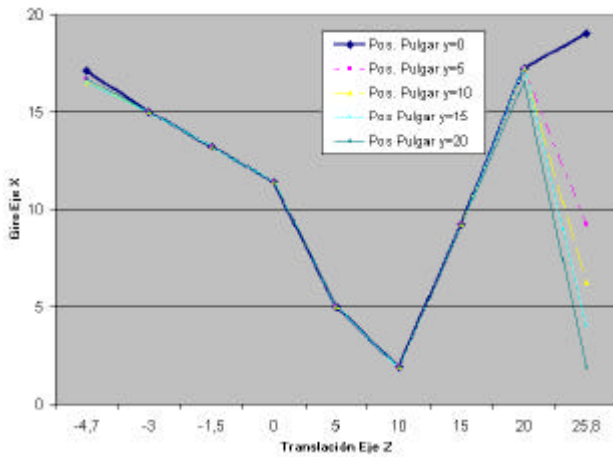


Figura 7: Giros en X vs traslaciones en Z

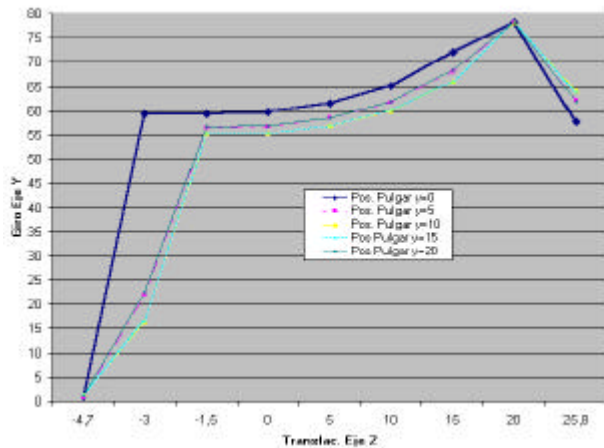


Figura 8: Giros en Y vs traslaciones en Z

### 4.3 ENSAYO TIP – ROLL

El último ensayo realizado, tiene por objetivo conocer la rotación alrededor del eje X que puede ejercerse sobre un objeto cilíndrico (una chapa) (Figura 9) la cual se encuentra agarrada por el dedo pulgar y el dedo índice, para diferentes traslaciones del objeto sobre el eje Y. En este estudio se han empleado dos objetos, de diámetros 12.5 y 25 mm. Al disminuir el tamaño del objeto a la mitad se produce un aumento del orden de 2.6 veces la capacidad de giro para la posición inicial.

Como se observa en la Figura 10 el giro aumenta conforme vamos trasladando el objeto hacia el sentido positivo del eje Y mientras que el giro disminuye con las traslaciones del objeto en el sentido positivo del eje Y.

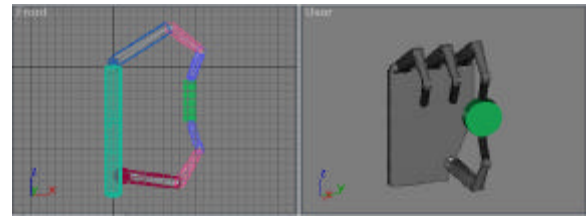


Figura 9: Manipulación Tip Roll de una chapa

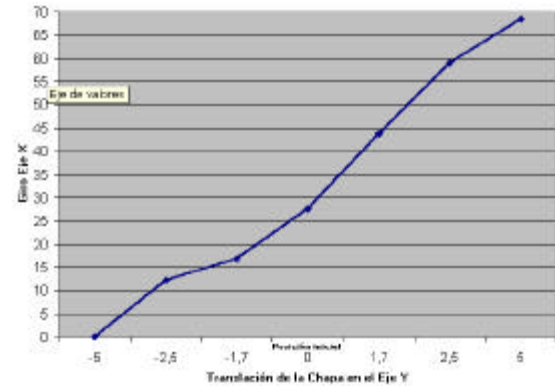


Figura 10: Manipulación Tip Roll de una chapa

Todos los ensayos se han repetido con objetos de tamaño superior e inferior a los objetos empleados en las experiencias aquí presentadas. Las curvas obtenidas no difieren cualitativamente de las obtenidas en los ensayos presentados, solamente se aprecia un aumento o reducción del rango de manipulabilidad de los objetos según sean éstos mayores o menores a los objetos empleados en este artículo.

## 5. DISCUSIÓN

En este trabajo se han presentado una serie de estudios relacionados con la manipulación de precisión por parte de manos robóticas antropomorfas. La aproximación utilizada, define un conjunto de primitivas de manipulación básicas que la mano puede llevar a cabo. Estas funciones primitivas son flexibles ya que incluyen una serie de parámetros asociados a la geometría y tamaño de los objetos a manipular y además, permiten su implementación partiendo de distintas topologías de agarre iniciales. Las primitivas pueden combinarse para dar lugar a tareas de manipulación complejas. Existen varias razones para utilizar funciones elementales de manipulación. Primeramente, la planificación de tareas se simplifica utilizando módulos predefinidos. La función primitiva se particulariza para la tarea a realizar a través de parámetros que especifican la topología inicial del agarre y el tamaño del objeto. Dicha configuración inicial y las trayectorias aproximadas de las puntas

de los dedos son parte de las funciones primitivas. Una segunda razón para utilizar primitivas motoras es la existencia de un número finito de movimientos que una mano puede llevar a cabo. Desde el punto de vista del desarrollo de lo que ha venido en llamarse durante los últimos años como Bio – Robótica, la ventaja de la aproximación empleada en este trabajo es que nos permite describir las tareas de manipulación de la mano respecto a un sistema de coordenadas espacial global, hecho que concuerda con hallazgos fundamentales de la neurociencia.

De los estudios llevados a cabo pueden extraerse las configuraciones iniciales de agarre óptimas para llevar a cabo cierta tarea de manipulación con una mano robótica antropomorfa cuyas dimensiones y grados de libertad se asemejan a la mano humana. La ejecución de tareas más complejas de manipulación puede establecerse mediante la secuenciación de funciones primitivas básicas, siempre que se tengan en cuenta los espacios de trabajo accesibles para cada primitiva.

En este trabajo sólo se han tenido en cuenta los aspectos cinemáticos de la tarea, por lo que en las primitivas no se hacen especificaciones sobre las fuerzas involucradas en los procesos. Además se ha partido de la hipótesis de que los objetos poseen superficies no deslizantes, son rígidos y los puntos de contacto con los dedos no varían durante la ejecución del movimiento. Como trabajo futuro se plantea la cuestión de la expansión en nuestra definición de primitiva motora que permita incluir una especificación de las fuerzas involucradas en la tarea así como el uso de superficies deslizantes. Se trata de llegar a un nivel de definición tal que permita la implantación de las primitivas en una mano robótica antropomorfa real y con capacidad para llevar a cabo tareas de manipulación complejas.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto SYNERAGH (SYstem Neuroscience and Engineering Research for Athropomorphic Grasping and Handling) BRITE-EURAM BE – 4505.

### Referencias

[1] Bekey, G.A, Tomovic, R, Zeljkovic, I. (1989) Control Architecture for the Belgrade/USC Hand. In S.T. Venkataraman and T. Iberall editors. *Dextrous Robot Hands*. pp. 136 – 149. Springer Verlag.

[2] Buchholz, B, Armstrong T.J. (1992) A kinematic model of the human hand to

evaluate its prehensile capabilities. *Journal of Biomechanics* 25 (2) pp. 149 – 162.

[3] Buchholz, B, Armstrong T.J. Goldstein, S.A (1992) Anthropometric data for describing the kinematics of human hand. *Ergonomics* 35 (3) pp. 261 – 273

[4] Bullock, D. Grossberg, S, Guenther, F.H (1993) A self organizing neural model of motor equivalent reaching and tool use by a multijoint arm. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 5:4 pp. 408 – 435

[5] Campbell, B. (1988) *Humankind emerging, Fifth edition*. Scott Foresman and Company.

[6] Cutkosky, M.R. (1985) *Robotic Grasping and Fine Manipulation*. Kluwer Academic Publishers.

[7] Garret, J.W (1971) The adult human hand: some anthropometric and biomechanical considerations. *Human factors* 13 pp. 117 – 131.

[8] Georgopoulos, A.P, Kalaska, J.F, Crutcher, M.D, Camintini, R.A, Massey, J.T (1983) Spatial coding of Movement. A hypothesis concerning the coding of movement direction by motor cortical populations. *Exp Brain research Suppl*, 7 pp. 327 –336

[9] Jacobsen, S. (1984) The Utah/MIT dextrous hand: a work in progress. *International Journal of Robotics Research* 3(4) pp. 21 – 50

[10] Michelman, P (1993) *Precision manipulation with dextrous robot hand*. PhD thesis, department of Computer Science, Columbia University, September 1993

[11] Santello, M, Flanders, M, Soechting, J.F (1998) Postural hand synergies for tool use. *Journal of Neuroscience* 18(23) pp. 10105 – 10115

[12] Speeter, T.H (1991) Primitive based control of Utah/MIT dextrous hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 866 - 875