Aplicación de un Control No Lineal Basado en Pasividad a una Mano Robot

Cornelio Morales Morales, Marco A. Oliver Salazar

Departamento de Ingeniería Electrónica, CENIDET
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México.
moliver@cenidet.edu.mx, cornelio@cenidet.edu.mx

Resumen: Este artículo propone el uso de un controlador no lineal basado en pasividad para controlar las posiciones de los dedos de una mano robótica denominada mano CENIDET. Para fines de comparación también se usaron controladores convencionales tipo PID y proporcional con compensación de gravedad (PD+G). Estas comparaciones no solo se realizaron a nivel simulación sino en forma experimental usando el prototipo de la mano CENIDET, donde se buscó emular los movimientos de una mano humana. Se usó el error cuadrático medio (ECM) como figura de mérito en la comparación. Se presenta en la sección dos el modelado cinemático y dinámico, mientras que en la sección tres se diseñan los controladores mencionados. En la sección cuatro se presenta los resultados obtenidos y la sección cinco presenta las principales conclusiones.

Palabras clave: Control no lineal, Pasividad, Modelo dinámico, Posición, Euler-Lagrange, Mano Cenidet.

1 Introducción

El problema de control de posición y trayectorias en robots manipuladores es bien conocido en el campo de la robótica. La mano robot CENIDET es un caso particular, desarrollada para reproducir algunos movimientos de la mano humana. Está constituido de 4 dedos con 4 grados de libertad cada uno. Para controlar las posiciones de los dedos se proponen controladores convencionales para comparar su desempeño con un controlador no lineal basado en pasividad, buscando obtener una congruencia entre las respuestas tanto de simulación como de experimentación.

Algunos de los controladores más estudiados aplicados a manipuladores son el control PID [1] y PD con compensación de gravedad (PD+G) [2]. En esta aplicación se desarrolla alternativamente un controlador basado en pasividad para ser aplicado a la mano CENIDET y obtener así información sobre su desempeño comparado con los otros dos controladores convencionales [3].

La principal motivación para la selección del controlador basado en pasividad se relaciona con las ventajas que éste presenta en términos de un manejo comparativamente más eficiente de la energía aplicada al sistema a controlar. El concepto de pasividad está relacionado con el de disipatividad, la cual fue tratada por

M.A. Moreno, C.A.Cruz, J. Álvarez, H. Sira (Eds.)
Special Issue: Advances in Automatic Control and Engineering
Research in Computing Science 36, 2008, pp. 263-273

Willems [4] dentro de los sistemas disipativos. A su vez, las aportaciones realizadas por Hill [5]-[6] constituyeron también un enfoque general sobre condiciones de estabilidad en sistemas interconectados retroalimentados. Por otra parte Byrnes et al [7] abordó la equivalencia de sistemas pasivos no lineales con un enfoque geométrico.

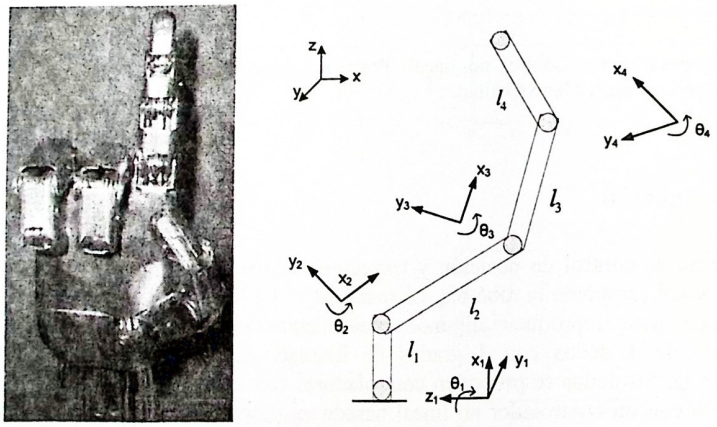
El desarrollo inicial del control basado en pasividad estuvo enfocado dentro del contexto de sistemas Hamiltonianos, con aplicaciones a sistemas manipuladores robóticos por Takegaki y Arimoto [13] y Slotine y Lie [14]).

El diseño del controlador por pasividad para la mano CENIDET mostrada en la figura (1a) [9], busca obtener mayor información sobre su comportamiento dinámico. Por lo que en este artículo se presenta en un inicio la metodología de modelado matemático (cinemático y dinámico), posteriormente se presentan los controladores convencionales y el controlador no lineal por pasividad para esta aplicación.

La metodología empleada para la obtención del modelado cinemático directo de la mano CENIDET se basa en la convención de Denavit-Hartenberg [11] y para el modelado dinámico se usa el formalismo de Euler-Lagrange [12]-[13]. Las consideraciones realizadas a cada modelado estuvieron fundamentadas en los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de una mano.

También para la aplicación del controlador basado en pasividad al prototipo de mano CENIDET se retomó el controlador propuesto por Paden y Panja [14].

Cada simulación y validación experimental de los controladores fueron hechas usando Matlab 7.1 y LabView 7.1, mostrando los resultados correspondientes.



(a) (b)

Fig. 1. Mano CENIDET

2 Modelo Matemático

2.1 Modelo cinemático directo

El problema El problema cinemático directo se abordó usando la convención Denavit-Hartenberg (D-H). De la figura 1b se determinaron los parámetros D-H (ver tabla 1) útiles para las matrices de transformación homogéneas, expresadas en la ecuación 1.

$$T={}^{0}A_{1}{}^{1}A_{2}{}^{2}A_{3}{}^{3}A_{4} \tag{1}$$

Tabla 1. Parametros Denavit-Hartenberg

Eslabón	θ_i	α_i	l_i	d_i
1	θ_1	90	l_1	0
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	l_3	0
4	θ_4	0	l_4	0

Sustituyendo los parámetros D-H en la ecuación 1 y resolviéndolas, se obtienen las coordenadas de posición,

$$\begin{aligned} p_x &= l_4c_1c_{234}+l_3c_1c_{23}+l_2c_1c_2+l_1c_1 \\ p_y &= l_4s_1c_{234}+l_3s_1c_{23}+l_2s_1c_2+l_1s_1 \\ p_z &= l_4s_{234}+l_3s_{23}+l_2s_2 \end{aligned} \tag{2}$$

donde: $c_i=\cos(\theta_i)$ y $s_i=sen(\theta_i)$.

2.2 Modelo dinámico

El modelo dinámico para robots manipuladores normalmente tiene la siguiente representación:

$$D(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=\tau \tag{3}$$

donde: $D(q)\in\Re^{n\times n}$ es la matriz de inercias, $C(q)\in\Re^{n\times n}$ representa la matriz de fuerzas Centrifugas y de Coriolis, $G(q)\in\Re^{n}$ es el vector de fuerzas gravitacionales y $\tau\in\Re^{n}$ es el vector de pares de entrada.

Adicionalmente, se usan las siguientes ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange (E-L), donde cada dedo es considerado como un manipulador independiente:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial}{\partial\dot{q}_i}L(q,\dot{q})\right]-\frac{\partial}{\partial q_i}L(q,\dot{q})=\tau_i \tag{4}$$

Para conformar la ecuación 4 es necesario encontrar el Lagrangiano, L, que es la diferencia entre la energía cinética total, $K(q,\dot{q})$, y la energía potencial total, $U(q)$. Es decir:

$$L(q,\dot{q}) = K(q,\dot{q}) - U(q) \tag{5}$$

3 Diseño de controladores

3.1 Controladores convencionales

- **Controlador PID**

La ley de control PID simplificada es:

$$\tau = K_p e + K_v \dot{e} + K_i \xi \tag{6}$$

donde: $K_p, K_i, K_v \in \Re^{n\times n}$ son las matrices de ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente (simétricas y definidas positivas).

- **Controlador PD+G**

Este controlador satisface el objetivo de control de posición pura en forma global para robots de n grados de libertad, seleccionando las matrices de diseño K_p y K_v como simétricas y definidas positivas. Para este controlador se requiere conocer parte del modelo dinámico del sistema a controlar, que es el vector de pares gravitacionales $G(q)$.

$$\tau = K_p e + K_v \dot{e} + G(q) \tag{7}$$

donde: $K_p, K_v, K_i \in \Re^{n\times n}$ son matrices definidas positivas y $G(q)$ es el término de gravedad.

3.2 Control No Lineal Basado en Pasividad (CBP)

Identificando que el problema de control es por naturaleza no lineal. El control basado en pasividad trata el problema de control mediante el moldeo de energía del sistema robótico.

El esquema de Takegaki y Arimoto consiste en una ley de control de posición, retroalimentando para ello la posición y las fuerzas gravitacionales para entonces añadir fuerzas articulares que conlleven a un mínimo en el error entre la posición deseada y la real. Esto se consigue adicionando amortiguamiento. Es decir:

$$\tau = g(q) - K_p e + v \tag{8}$$

donde: $v = -K_d \dot{e}$ es una nueva entrada de control.

Tomando la ley de control de Paden y Panja (que es una modificación de (8) donde se emplean los conceptos de energía cinética y energía potencial) se tiene:

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q,\dot{q})\dot{q}_d - K_p e + v \tag{9}$$

donde $v = -K_d e$.

4 Resultados

4.1 Espacio de trabajo

La representación del espacio de trabajo de la mano CENIDET usando (2) y los parámetros de [10] es:

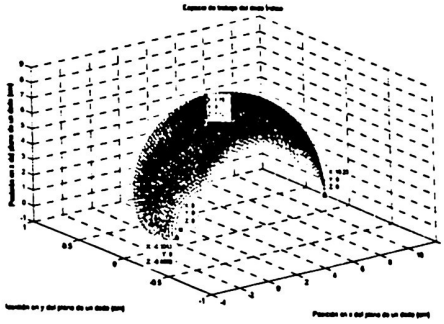


Fig. 2. Espacio de trabajo del dedo índice.

Los valores extremos en ese espacio de trabajo son: (10.23, 0, 0), (-0.3053, 0, -0.5008) y (1.76, 0,6.521); y los ángulos correspondientes para cada falange son: ($\theta_1=\theta_2=\theta_3=\theta_4=0°$), ($\theta_1=0°$, $\theta_2=45°$, $\theta_3=55°$, $\theta_4=35°$), y ($\theta_1=0°$, $\theta_2=90°$, $\theta_3=110°$, $\theta_4=70°$).

4.2 Control de Posición

Se busca comparar los 3 tipos de controladores (PID, PD+G y CBP) para el control de una posición deseada para cada una de las falanges de un dedo de la mano CENIDET.

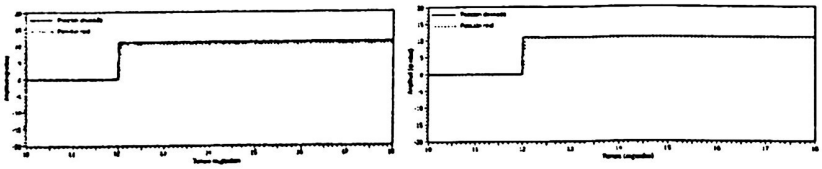
Se presentan las pruebas realizadas tanto en simulación como en experimentación en 2 etapas: La primera etapa consiste en realizar movimientos de abducción/aducción pura ($q_2=q_3=q_4=0°$). La segunda etapa consiste en realizar sólo movimientos de flexión/extensión ($q_1=0°$).

- **Control de posición para movimientos de abducción/aducción**

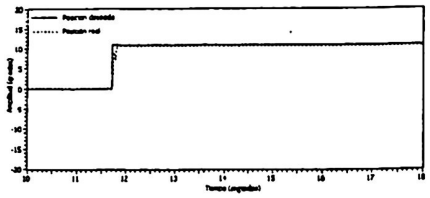
Los resultados de simulación y experimentación para este tipo de movimiento usando los 3 tipos de controladores mencionados se presentan a continuación. El movimiento consistió en mover la articulación 1 de la falange de abducción de una posición de 0° a 11°. Los errores de posición son:

- $e_{1\,Simulación}$: PID = -0.03411°, CBP = 1.765° e-5, PD+G = 0.0004938°.
- $e_{1\,Experimentación}$: PID = 0.642223°, CBP = 0.391869°, PD+G = 0.413175°.

Las figuras 3a, 3b y 3c ilustran el comportamiento dinámico que presenta la falange de abducción donde el controlador con mejor tiempo de respuesta es el CBP.



(a) (b)



(c)

Fig. 3. Experimentación: (a) Controlador PID, (b) Controlador PD+G y (c) CBP, movimiento de abducción, q_1.

El controlador con menor tiempo en alcanzar la referencia fue el CBP con un tiempo de 0.06 segundos, a diferencia de los controladores PID y PD+G (0.08 seg. y 0.07 seg., respectivamente).

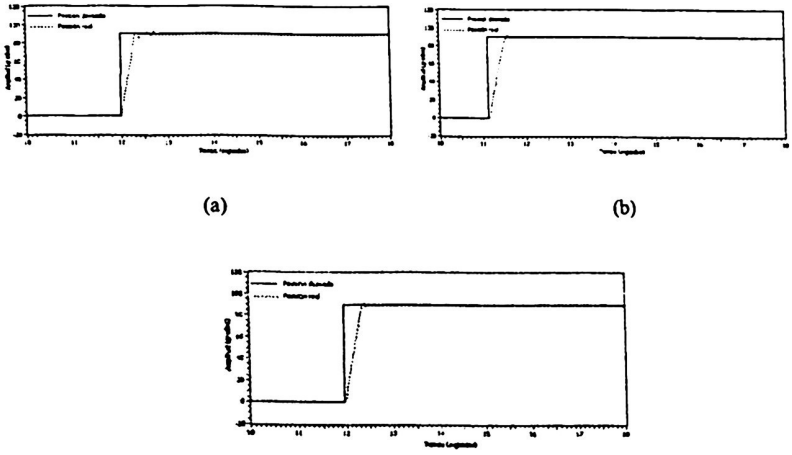
- **Control de posición para movimientos de flexión/extensión**

En esta segunda etapa se busca el control de posición de las falanges proximal, medial y distal simultáneamente. Los resultados correspondientes a cada falange se presentan a continuación.

Control de posición de la falange proximal

Los resultados del control de posición para la falange proximal de una posición de 0° a 90°, en simulación y en experimentación se muestran a continuación. Los errores de posición son:

- $e_{2\,Simulación}$: PID = -0.1669°, CBP = 1.173° e-9, PD+G = 3.598° e-7.
- $e_{2\,Experimentación}$: PID = 0.492728°, CBP = 0.191761°, PD+G = 0.44478°.



(a) (b)

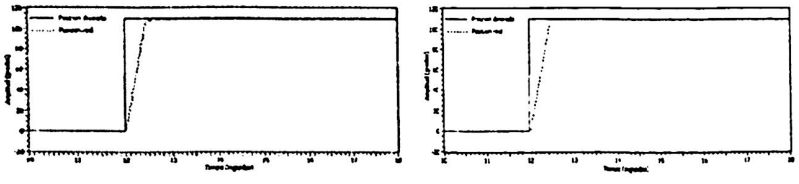
Fig. 4. Experimentación: (a) Controlador PID, (b) Controlador PD+G y (c) CBP, movimiento de la falange proximal, q_2.

Experimentalmente (Figuras 4a, 4b y 4c), los controladores con el menor tiempo para alcanzar la referencia fueron el CBP y el control PD+G, cuyo tiempo fue de 0.55 segundos, a diferencia del control PID (0.65seg).

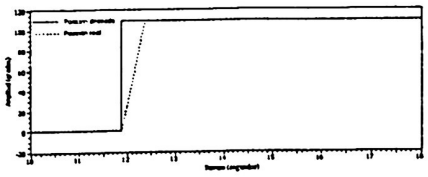
Control de posición de la falange medial

Los resultados de controlar la falange medial de una posición de 0° a 110° tanto en simulación como en experimentación se muestran a continuación. Los errores de posición son:

- $e_{3\,Simulación}$: PID = -0.204°, CBP = 1.434° e-9, PD+G = 4.665° e-7.
- $e_{3\,Experimentación}$: PID = 0.650746°, CBP = 0.541548°, PD+G = 0.719993°.



(a) (b)



(c)

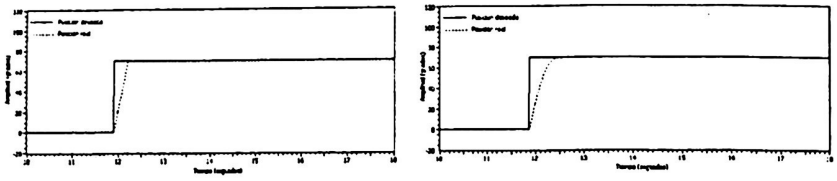
Fig. 5. Experimentación: (a) Controlador PID, (b) Controlador PD+G y (c) CBP, movimiento de la falange medial, q_3.

Experimentalmente (Figuras 5a, 5b y 5c), el controlador con un menor tiempo para alcanzar la referencia fue el CBP con un tiempo de 0.50 segundos, a diferencia de los controladores PID y PD+G (0.68 seg. y 0.51 seg., respectivamente).

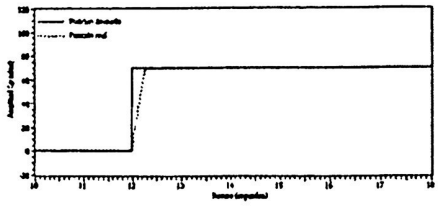
Control de posición de la falange distal

Los resultados de controlar la falange distal de una posición de 0° a 70° tanto en simulación como en experimentación se muestran a continuación. Los errores de posición son:

- $e_{4\,Simulación}$: PID = -0.204°, CBP = 1.434° e-9, PD+G = 4.665° e-7.
- $e_{4\,Experimentación}$: PID = 0.650746°, CBP = 0.541548°, PD+G = 0.719993°.



(a) (b)



(c)

Fig. 6. Experimentación: (a) Controlador PID, (b) Controlador PD+G y (c) CBP, movimiento de la falange distal, q_4.

En la parte experimental el controlador con menor tiempo en alcanzar la referencia fue el CBP (Fig. 6c) con un tiempo de 0.30 segundos, a diferencia de los controladores PID (Fig. 6a) y PD+G (Fig. 6b) (0.34 seg. y 0.6 seg., respectivamente).

4.3 Control de Seguimiento de Trayectorias

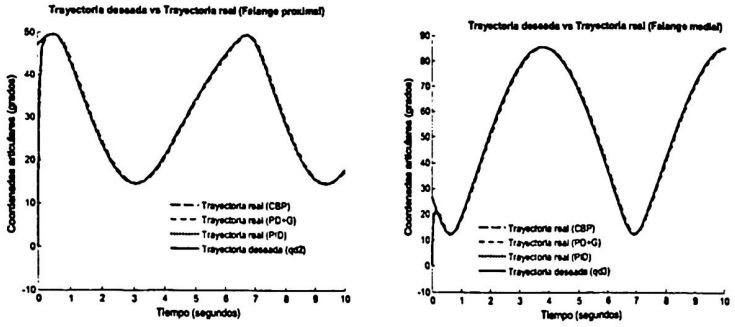
Para la prueba de seguimiento a trayectorias aplicadas a un dedo de la mano CENIDET (dedo índice) se plantea como objetivo que el extremo del dedo siga una trayectoria circular de acuerdo a los límites de operación y el espacio de trabajo del dedo.

Se presenta sólo la simulación del seguimiento a trayectorias aplicando los 3 controladores. La validación experimental para seguimiento a trayectorias no fue posible debido a problemas de tensión en las cuerdas al momento de alcanzar un punto y posteriormente al regresar al mismo punto. Esto produjo que la posición angular que señalaban los encoders no coincidiera con la posición real de cada falange.

La prueba de seguimiento de trayectorias en simulación es realizada sin movimiento de abducción/aducción. Sin embargo, el movimiento de flexión/extensión se realiza moviendo las falanges proximal, medial y distal simultáneamente.

Las figuras de la prueba de seguimiento a una trayectoria circular se muestran a continuación. Los errores del seguimiento a trayectorias son:

- PID: $q_1 = 0°$, $q_2 = 0.6650°$, $q_3 = 0.3785°$, $q_4 = 0.7964°$.
- CBP: $q_1 = 0°$, $q_2 = 0.2208°$, $q_3 = 0.1258°$, $q_4 = 0.2654°$.
- PD+G: $q_1 = 0°$, $q_2 = 0.4588°$, $q_3 = 0.2607°$, $q_4 = 0.5471°$.



(a) Falange proximal, q_2 (b) Falange medial, q_3.

Fig. 7. Simulación de seguimiento de trayectoria.

La figura 7a ilustra el comportamiento dinámico de la falange proximal empleando los controladores propuestos. Donde el tiempo en alcanzar la trayectoria deseada fueron: CBP = 0.2709 seg., PID = 0.41 seg. y PD+G = 0.3405 seg.

Similarmente, la figura 7b ilustra en simulación el comportamiento dinámico de la falange medial, presentándose en seguida el tiempo en alcanzar la trayectoria deseada: CPB = 0.2 seg., PID = 0.27 seg. y PD+G = 0.8127 seg., respectivamente.

Finalmente, la figura 8 representa el comportamiento dinámico de los controladores sometidos a seguir una trayectoria deseada, donde el tiempo en alcanzar dicha trayectoria fueron: CBP = 0.2314 seg., PID = 0.53 seg. y PD+G = 0.63 seg.

Para medir la cantidad de error presentado en cada prueba de seguimiento a trayectorias se usó el error cuadrático medio.

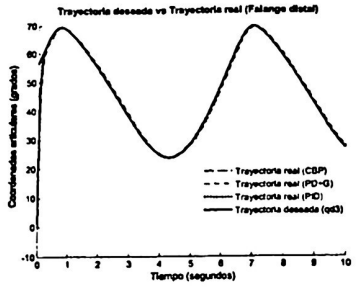


Fig. 8. Seguimiento de trayectoria en la falange distal, q_4.

5 Conclusiones

El modelado cinemático directo de la mano CENIDET resultó indispensable para conocer con precisión su espacio de trabajo. También resultó necesario conocer las fuerzas que actúan en el prototipo a través de su modelo dinámico. Con toda esta información fue posible desarrollar controladores de posición y seguimiento de trayectorias para la mano CENIDET.

Mediante las ecuaciones E-L se diseñó un controlador basado en pasividad que tiene la característica de estar enfocado al manejo de energía mediante el concepto de moldeo de energía. La aplicación de controles clásicos en robótica como el control PD+G y PID ayudan a comparar el desempeño de un CBP.

De la simulación de los diferentes controladores, se concluye que el CBP propuesto presenta mejores características como son; mejor tiempo de respuesta, no tiene sobretiros, tiene una respuesta suave y hace uso de la energía interna del sistema.

De la comparación de resultados experimentales y de simulación en esta aplicación se observa que éstos no son exactamente los mismos. Entre las causas de esta diferencia está el no considerar los efectos de fricción en el modelo dinámico y el grado de "patinaje" de bandas sobre las poleas (fenómenos que no son triviales de incluir en el modelado). No obstante, los resultados previamente obtenidos en el proceso de simulación fueron muy importantes en la etapa de implementación práctica de los mismos en el prototipo, teniendo que hacer ajustes finos en las ganancias de los controladores para que los resultados experimentales fueran congruentes.

La implementación experimental de los controladores sometidos a prueba de seguimiento a trayectorias no fue posible debido a problemas mecánicos presentados

en la mano CENIDET. Fue posible llevar un dedo a una posición deseada, pero controlar su posición de regreso hasta alcanzar su posición inicial no fue posible debido a que existe un patinaje de las bandas sobre las poleas.

Referencias

1. M. Takegaki and S. Arimoto, "A new feedback method for dynamic control of manipulators", Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 103, pp. 119-125, 1981.
2. S. Arimoto and F. Miyazaki, "Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulators of sensory capability", in M. Brady and R.P. Paul (eds.), Robotics Research: First International Symposium, pp. 783-799, MIT Press, Boston, Mass., 1984.
3. S. Arimoto, "Passivity-Based Control", International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, pp. 227-232, April 2000.
4. J.C. Willems, "Dissipative dynamical systems, part I and II", Archieves of Rational Mechanics and Analysis, Vol 45, pp. 321-393, 1972.
5. A. Isidori and J.C. Willems, "Passivity feedback equivalence and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems" IEEE Transactions on Automatic Control Vol. 36 pp. 1228-1240, 1991.
6. D. Hill and P. Moyland, "The stability of nonlinear dissipative systems" IEEE Transactions on Automatic Control Vol. 21, pp. 708-711, 1976.
7. D. Hill and P. Moyland, "Stability results for nonlinear feedback systems " Automática Vol. 13, pp. 377-382, 1977.
8. M. Takegaki and S. Arimoto, "A new feedback method for dynamic control of manipulators" ASME J. Dynamic Systems", Measurement and Control , Vol. 102, pp. 119-125, 1981.
9. J.J. Slotine and W. Li, "Adaptive Manipulator Control: a case of study" IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. AC-33, pp. 995-1003, 1988.
10. C. Hernando, H. Jesús, Tesis de Maestría: "Diseño de un sistema articulado emulando el movimiento de una mano", CENIDET, 2006.
11. J. J. Craig, "Robótica", Tercera Edición, Impreso en México, 2006, Edit. Prentice Hall.
12. A. Loria, "Notes on Dynamics of Eulcr-Lagrange Systems", Center for Control Engineering and Computation University of California. 1998.
13. R. Kelly, V. Santibáñez, "Control de Movimiento de Robots Manipuladores". Automática y robótica 2003, Edit. Prentice Hall.
14. B. Paden y R. Panja, Department of mechanical engineering and the NSF Center for Robotics in Microelectronics, "Globally asymptotically stable PD+ controller for robot manipulators", Int. Journal control, vol. 47, No.6, University of California, USA,1988, pp. 1697-1712.