



EVALUACION EXPERIMENTAL DE CONTROLADORES DE POSICIÓN TIPO SATURADOS PARA ROBOT MANIPULADORES

Jorge L. Barahona Avalos, Luis E. Espinosa Maya, Fernando Reyes Cortés
Facultad de Ciencias de la Electrónica-BUAP
Av. 18 Sur y San Claudio S/N, Puebla, Pue.

jbarahona@ece.buap.mx, luisseem@ece.buap.mx, freves@ece.buap.mx

RESUMEN

Este artículo describe la comparación experimental entre cuatro controladores de posición tipo saturados para robot manipuladores sobre un manipulador antropomórfico de transmisión directa de tres grados de libertad (3 GDL). Se presentan los resultados experimentales de los siguientes controladores: controlador tipo tangente hiperbólica, controlador tipo saturado, controlador tipo arco tangente y controlador coseno hiperbólico saturado. Todos los controladores incluyen compensación de la gravedad y fueron probados para una misma posición deseada.

1. INTRODUCCION

El fenómeno de saturación es una de las no linealidades que aparece con mayor frecuencia en los sistemas de control de robots manipuladores; éste fenómeno deteriora el desempeño del sistema de control y conduce a fallas térmicas y/o mecánicas. La saturación en los manipuladores está presente cuando los actuadores de las articulaciones son manejados por señales de control suficientemente grandes. Como resultado de lo anterior, si la amplitud de salida del controlador está fuera del rango lineal de los actuadores, entonces los torques entregados por los mismos a las articulaciones del manipulador serán diferentes de aquellos demandados por el controlador.

Adicionalmente al problema anterior, los manipuladores industriales actuales están equipados con reguladores (controladores de posición) tales como el proporcional derivativo (PD) o proporcional derivativo integral (PID), los cuales han demostrado ser efectivos para resolver el problema de control de posición en robot manipuladores [1]. No obstante, los controladores mencionados no son robustos contra el problema de saturación debido en gran parte a que suponen implícitamente que los actuadores son fuentes infinitas de torques. Sin embargo, los actuadores de las articulaciones de los manipuladores están restringidos a entregar torques limitados. Así, los

controladores PD y PID no pueden resolver el problema de la saturación.

Motivados por el interés práctico de desarrollar nuevos algoritmos de control de posición que conduzcan a la estabilidad asintótica global del sistema de lazo cerrado controlador-robot con restricciones sobre las capacidades de los actuadores, diversos autores han publicado resultados experimentales de controladores que resuelven con excelente grado de aproximación el problema de la saturación. Entre estos trabajos cabe destacar los siguientes: controlador tipo tangente hiperbólica [2], controlador tipo saturado [3], controlador tipo arco tangente [4] y controlador tipo coseno hiperbólico saturado [5]. Los controladores anteriores están basados en la metodología de diseño de controladores de moldeo de energía más inyección de amortiguamiento [6] [7]. Cada controlador está constituido de tres componentes: una función de saturación en la parte proporcional, una función de saturación en la parte derivativa y un término de compensación de la gravedad.

En este artículo se discute la evaluación experimental de los cuatro controladores anteriores sobre un robot antropomórfico de transmisión directa y de tres grados de libertad. El artículo está organizado como sigue: en la sección 2 se presenta una breve exposición de la dinámica de robots manipuladores y sus propiedades fundamentales. La sección 3 está dedicada a revisar los algoritmos de control que se evalúan experimentalmente. En la sección 4 se resumen los componentes principales del sistema experimental. Los resultados experimentales sobre el robot de transmisión directa se presentan en la sección 5. Finalmente en la sección 6 se ofrecen algunas conclusiones.

2. DINAMICA DEL ROBOT.

La dinámica de un robot manipulador serial de n-eslabones puede ser escrita como [8]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$



donde q es el vector $n \times 1$ de desplazamientos articulares, \dot{q} es el vector $n \times 1$ de velocidades articulares, t es el vector $n \times 1$ de pares aplicados, $M(q)$ es la matriz de inercia del manipulador de $n \times n$ simétrica definida positiva, $C(q, \dot{q})$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis de $n \times n$, y $g(q)$ es el vector $n \times 1$ de pares gravitacionales obtenidos como el gradiente de la energía potencial del robot. Aún cuando la ecuación de movimiento (1) es compleja, tiene varias propiedades fundamentales que pueden ser explotadas para facilitar el diseño de leyes de control para robots manipuladores.

3. ALGORITMOS DE CONTROL

El problema de control de posición para robots manipuladores (el así llamado problema de regulación) sujeto a restricciones sobre las capacidades de los actuadores ha sido estudiado, y descrito en la literatura existente en robótica, en implementaciones de tiempo real sobre manipuladores de dos grados de libertad de transmisión directa, donde la comparación del desempeño es realizada contra el clásico controlador PD con compensación de la gravedad. Al mejor conocimiento de los autores no se ha reportado la evaluación experimental de los controladores diseñados sobre robots de tres grados de libertad así como la comparación del desempeño entre controladores tipo saturados. En este trabajo se presenta la evaluación experimental y comparación del desempeño entre los cuatro controladores descritos en [2], [3], [4] y [5]. En lo que sigue se empleará la siguiente notación: $\tilde{q} \in R^n$ es el vector de errores de posición articulares con $\tilde{q} = q_d - q$, donde $q_d \in R^n$ representa el vector de posiciones articulares deseada; $K_p \in R^{n \times n}$ representa la matriz de ganancia proporcional la cual es diagonal y definida positiva; $K_v \in R^{n \times n}$ representa la matriz de ganancia derivativa la cual es definida positiva.

3.1 Controlador tangente hiperbólica

Este controlador fue introducido por Cai y Song para reducir el error de posición debido al fenómeno de fricción articular stick-slip. El análisis formal de estabilidad para este controlador puede encontrarse en [2]. La ley de control está dada por:

$$t = K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \dot{q} + g(q) \quad (2)$$

“SEGUNDO CONGRESO NACIONAL DE ELECTRONICA, 24, 25, 26 DE SEPTIEMBRE DE 2002
CENTRO DE CONVENCIONES WILLIAM O JENKINS, PUEBLA PUE. MEXICO”



3.2 Controlador saturado.

Este controlador fue presentado por Santibáñez *et al*, para resolver el problema de la fricción stick-slip tomando en cuenta las restricciones sobre las capacidades de los actuadores. La demostración formal de estabilidad puede revisarse en [3]. La ley de control está dada por:

$$t = \text{Sat}\{K_p \tilde{q}\} - \text{Sat}\{K_v \dot{q}\} + g(q) \quad (3)$$

3.3 Controlador arco tangente

El controlador arco tangente fue introducido por Reyes *et al*, el cual toma en cuenta las limitaciones sobre las capacidades de los torques de los actuadores de las articulaciones del manipulador. Para una revisión de la demostración formal de estabilidad puede revisarse [4]. La ley de control está dada por:

$$t = K_p \arctan(\tilde{q}) - K_v \arctan(\dot{q}) + g(q) \quad (4)$$

3.4 Controlador coseno hiperbólico

Fue introducido por Reyes *et al* para resolver el problema de las limitaciones en las capacidades de los actuadores. Forma parte de toda una familia de controladores tipo saturados. Para una revisión del análisis formal de estabilidad del controlador puede consultarse [5]. La ley de control está dada por:

$$t = K_p \frac{\sinh(\tilde{q})}{1 + \cosh(\tilde{q})} - K_v \tanh(\dot{q}) + g(q) \quad (5)$$



Figura 1: Plataforma experimental

4. SISTEMA EXPERIMENTAL



Los experimentos fueron realizados sobre una plataforma experimental diseñada y construida en la FCE-BUAP. El robot manipulador (Véase la Figura 1) está constituido por eslabones rígidos de Aluminio 6061 actuados por motores de transmisión directa de Parker Compumotor. Entre las ventajas de este tipo de motores se incluyen la capacidad para manejar las articulaciones sin necesidad de engranes y una fricción significativamente baja comparada a los actuadores con transmisión por engranes. Las características principales de los motores se listan en la Tabla I.

Tabla I			
Eslabón	Modelo	Torque[Nm]	P/rev
Base	DR1160B	60	819,200
Hombro	DR1100E	100	819,200
Codo	DM1004C	4	655,360

Los motores de transmisión directa son operados en el modo de torque, de modo tal que actúan como una fuente de torque y aceptan un voltaje analógico como señal de referencia. La información de la posición es obtenida de encoders incrementales localizados en los motores. El algoritmo estándar de diferenciación numérica recursiva es aplicado a las mediciones de posición articular para obtener las señales de velocidad. Además de los sensores de posición y los manejadores de los motores se incluye una tarjeta de control de movimiento fabricada por Precision MicroDynamics Inc., la cual es utilizada para obtener las posiciones articulares de los encoders. Los algoritmos de control fueron escritos en lenguaje C y ejecutados sobre una PC Pentium II (333 Mhz) a una frecuencia de muestreo de 2.5 milisegundos. Con respecto a la dinámica del robot dada en (1), el único requisito para la implementación experimental de los controladores de posición es el conocimiento de la estructura del vector de pares gravitacionales, el cual para el caso que nos ocupa, está dado por:

$$g(q) = \begin{pmatrix} 0 \\ 3.845\text{sen}(q_2) + 1.82\text{sen}(q_2 + q_3) \\ 1.82\text{sen}(q_2 + q_3) \end{pmatrix}$$

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los resultados experimentales para todos los algoritmos de control de posición mencionados previamente en la sección 3. Se

llevaron a cabo una gran cantidad de experimentos para cada controlador; sin embargo aquí se presentan los mejores resultados obtenidos. La estructura del vector de posiciones articulares seleccionada es la siguiente: $q_{d1} = 45^\circ$, $q_{d2} = 45^\circ$, $q_{d3} = 90^\circ$. El vector de posición inicial en todos los casos fue seleccionado como el vector cero.

5.1 Controlador tangente hiperbólica

El mejor resultado obtenido para este controlador estuvo dado por la selección de las matrices de ganancia proporcional y derivativa siguientes:

$$K_p = \begin{pmatrix} 44.85 & 0 & 0 \\ 0 & 12.0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.94 \end{pmatrix} \quad K_v = \begin{pmatrix} 0.405 & 0 & 0 \\ 0 & 0.265 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{pmatrix}$$

Los errores de posición así como los pares aplicados obtenidos se muestran en las Figuras 2 y 3 respectivamente.

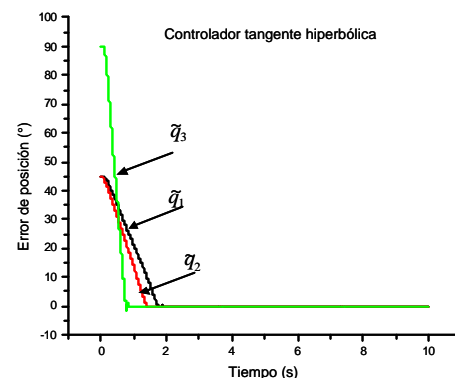


Figura 2: Errores de posición del controlador tangente hiperbólica

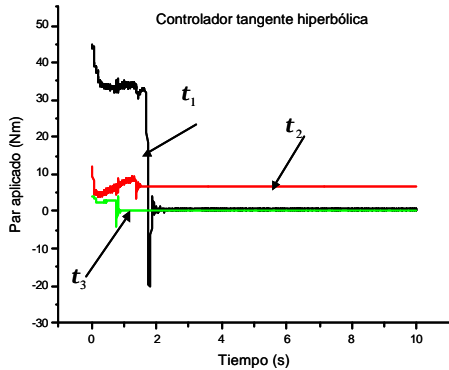


Figura 3: Pares aplicados del controlador tangente hiperbólica

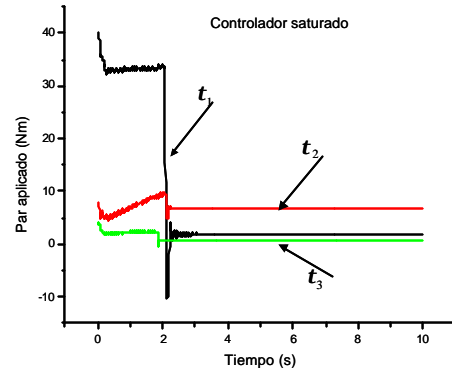


Figura 5: Pares aplicados del controlador saturado

5.2 Controlador saturado

El mejor resultado obtenido para este controlador estuvo dado por la selección de las matrices de ganancia proporcional y derivativa siguientes:

$$K_p = \begin{pmatrix} 40.0 & 0 & 0 \\ 0 & 8.0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.8 \end{pmatrix}, K_v = \begin{pmatrix} 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.035 \end{pmatrix}$$

Los errores de posición así como los pares aplicados obtenidos se muestran en las Figuras 4 y 5 respectivamente.

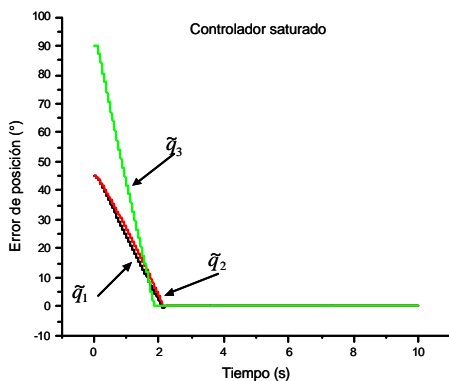


Figura 4: Errores de posición del controlador saturado

5.3 Controlador arco tangente

El mejor resultado obtenido para este controlador estuvo dado por la selección de las matrices de ganancia proporcional y derivativa siguientes:

$$K_p = \begin{pmatrix} 25.65 & 0 & 0 \\ 0 & 4.15 & 0 \\ 0 & 0 & 3.15 \end{pmatrix}, K_v = \begin{pmatrix} 4.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0575 \end{pmatrix}$$

Los torques aplicados así como los errores de posición obtenidos se muestran en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

5.4 Controlador coseno hiperbólico

El mejor resultado obtenido para este controlador estuvo dado por la selección de las matrices de ganancia proporcional y derivativa siguientes:

$$K_p = \begin{pmatrix} 45.77 & 0 & 0 \\ 0 & 6.4 & 0 \\ 0 & 0 & 3.94 \end{pmatrix}, K_v = \begin{pmatrix} 0.295 & 0 & 0 \\ 0 & 0.345 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0515 \end{pmatrix}$$

Los torques aplicados así como los errores de posición obtenidos se muestran en las Figuras 8 y 9 respectivamente.

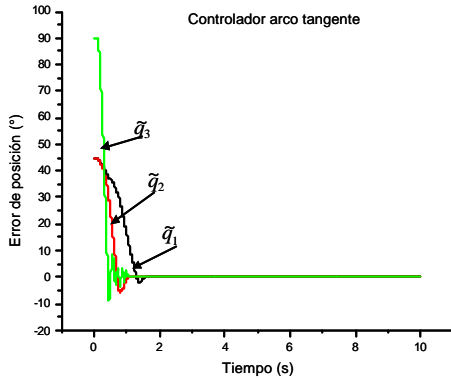


Figura 6: Errores de posición del controlador arco tangente

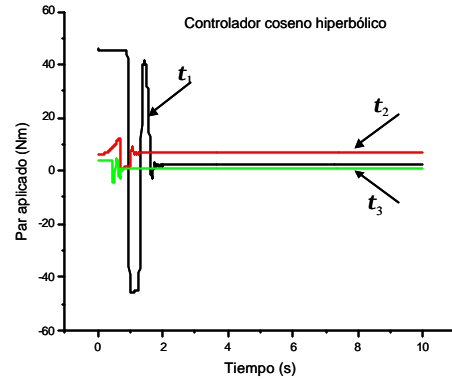


Figura 9: Pares aplicados del controlador coseno hiperbólico

5.5 Índices de desempeño

La evaluación del desempeño es resuelta implementando el valor escalar de la norma L_2 como una medida numérica objetiva para una curva de error completa. En otras palabras la norma $L_2[\tilde{q}]$ mide el “promedio” rms del error de posición \tilde{q} , el cual está dado por [9] [10]:

$$L_2[\tilde{q}] = \sqrt{\frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t |\tilde{q}|^2 dt}$$

Donde $t, t_0 \in R_+$, son los tiempos inicial y final respectivamente. Un valor pequeño de $L_2[\tilde{q}]$ representa un error de posición más pequeño y el mejor desempeño del controlador evaluado. Los índices de desempeño $L_2[\tilde{q}(t)]$ para cada uno de los controladores dados por las ecuaciones (2) a la (5) son mostrados en la Figura 10.

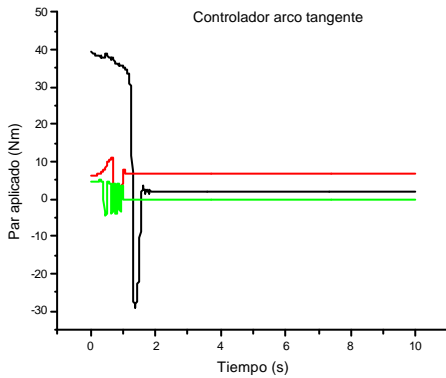


Figura 7: Pares aplicados del controlador arco tangente

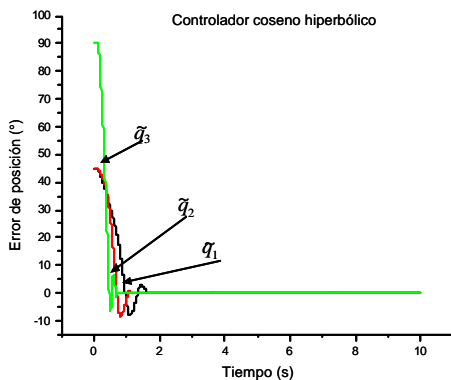


Figura 8: Errores de posición del controlador coseno hiperbólico

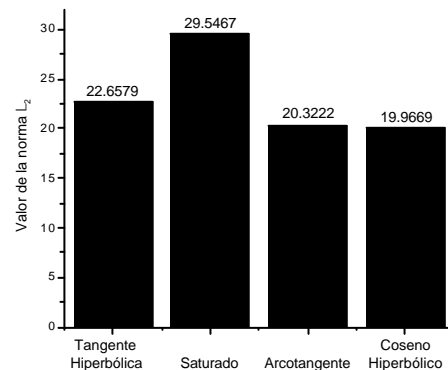


Figura 10: Índices de desempeño de los controladores



6. CONCLUSIONES

En este artículo se probaron experimentalmente cuatro diferentes controladores de posición tipo saturados para robots manipuladores sobre un robot de transmisión directa de tres grados de libertad. De los resultados experimentales obtenidos se observa que todos los controladores evaluados resuelven adecuadamente el problema de la saturación de los actuadores. El desempeño de cada controlador fue comparado contra los restantes empleando el valor escalar de la norma L_2 y en base a los resultados experimentales puede concluirse cautelosamente que los controladores con mejor desempeño son el tipo coseno hiperbólico y el tipo arco tangente.

REFERENCIAS

- [1] Craig J.J., *Introduction to robotics: mechanics and control* (Addison-Wesley Reading, MA, 1989).
- [2] Cai, L. Song, G., Joint stick-slip friction compensation of robot manipulator by using smooth robust controllers, *J. Robotic Systems*, 11, 1994, 451-470.
- [3] Santibañez V., Kelly R. & Reyes F., A new setpoint controller with bounded torques for robot manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1), 1998, 126-133.



- [4] Reyes F., Barahona J. & Espinosa L., Trigonometric Saturated Controller for robot manipulators, *Proc. 2th WSEAS Int. Conf. on Instrumentation, Measurement, Control, Circuits and Systems*, Cancún, México, 2002, 356-362.
- [5] Reyes F., Espinosa L. & Barahona J., Family of saturated controllers for robot manipulators, *Proc. of the IASTED International Conf. on Control and Applications*, Cancún, México, 2002, 250-255.
- [6] Santibañez V. & Kelly R., Energy shaping based controllers for rigid and elastic joint robots: analysis via passivity theorems, *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, 3, 1997, 225-2231.
- [7] Ortega R., Loria A., Nicklasson P. & Sira-Ramírez H., *Passivity-based control of euler lagrange systems*, (Springer-Verlag, 1998).
- [8] Spong M. & Vidyasagar M., *Robot dynamics and control*(John Wiley and Sons, NY, 1989).
- [9] Whitcomb L.L., Rizzi A.A. & Koditschek D.E., Comparative experiments with a new adaptive controller for robot arms, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(1), 1993, 59-69.
- [10] De Jager B. & Banens J., Experimental Evaluations of robot controllers, *Proc.33th Conf. on Decision and Control*, Lake Buena Vista, Fl. U.S.A., 1994, 363-368.