

Control tangente hiperbólico con ganancia variable

Ortega Méndez Abdiel, Reyes Cortés Fernando, Vargas Treviño Aurora, Vergara Limón Sergio.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica,
Posgrado en Automatización.

Resumen

Actualmente en la industria existen procesos donde se requiere la intervención de robots manipuladores. Donde la eficiencia del proceso depende fundamentalmente del algoritmo de control de dicho robot. Uno de los controladores más conocidos y utilizados es el control proporcional-derivativo, donde su desempeño depende en gran medida de la sintonía las ganancias. El problema de sintonización es un proceso no trivial que resulta tedioso debido a que se realiza de manera empírica. En este artículo se presenta el análisis de un control tipo tangente hiperbólico con ganancias variables autosintonizables. Para validar las propuestas teóricas se llevará a cabo la implementación conocida como regulación en un robot de transmisión directa de 3 grados de libertad en ambiente Windows XP.

Palabras clave: Control proporcional derivativo, sintonía de las ganancias, robot de 3 grados de libertad.

1. Introducción

Para que un robot manipulador realice correctamente una tarea encomendada, se requiere de un algoritmo de control de alto desempeño. Por lo tanto, el diseño de algoritmos de control se ha convertido en una actividad científica permanente y sistemática, con la finalidad de proponer nuevos esquemas con potencialidades, desempeño y presentaciones adecuadas para una correcta ejecución de la tarea encomendada al robot.

En este trabajo se aborda la problemática de control de robots manipuladores (regulación) donde se propone una sintonía automática con ganancias variables de un controlador con estructura tangente hiperbólica. Para validar la propuesta de sintonía, el algoritmo de control se implementa en un robot de

transmisión directa de 3 grados de libertad (gdl) del grupo de Robótica de la Facultad de Ciencias de la Electrónica. Para esto se desarrolla una interfaz en Visual Studio C++ en ambiente de Windows XP.

Actualmente en el estado del arte se encuentran reglas de sintonía utilizando lógica difusa y redes neuronales [1]. También se han propuesto algoritmos para hacer más suave la respuesta del grado de libertad a la entrada de un controlador [2], algunos otros investigadores optan por utilizar técnicas de adaptación [3][4]. Sin embargo, aún existe el problema de sintonía de las ganancias. Este problema será abordado en las siguientes secciones.

2. Plataforma Experimental

La plataforma experimental sobre la que se evaluará el algoritmo consiste en un robot de transmisión directa de 3 gdl que se mueve en un espacio tridimensional. El robot se muestra en la figura 1 y consta de tres articulaciones o eslabones rígidos fabricados de aluminio 6061 unidos mediante articulaciones del tipo rotacional con servomotores de transmisión directa, para estos es necesario 3 servoamplificadores (uno por cada servomotor) para proporcionar la energía necesaria de tal forma que el robot pueda desplazarse en su espacio de trabajo [5].



Fig. 1. Robot de 3 grados de libertad

Este robot se caracteriza por tener una arquitectura abierta, lo que significa que es posible evaluar cualquier algoritmo experimental de control.

Para enviar y recibir señales de los servoamplificadores se utiliza la tarjeta de instrumentación LC228 de la compañía Precision Micro Dynamics [6]. Esta tarjeta se conecta al bus PCI y trabaja con un procesador DSP en punto flotante, permitiéndonos trabajar a grandes velocidades en tiempo real. La tarjeta cuenta con 4 DAC's, decodificadores de cuadratura, entradas y salidas digitales entre lo más relevante para nuestra aplicación.



Fig. 2. Tarjeta LC228

El algoritmo de la interfaz que maneja al robot de 3 gdl se programó en Visual C++ en la plataforma Windows XP, ya que el fabricante provee librerías DLL que trabajan bajo este sistema operativo y que sirven para leer y escribir en el DSP de la tarjeta.

El algoritmo programado que maneja al robot se muestra en la figura 3.

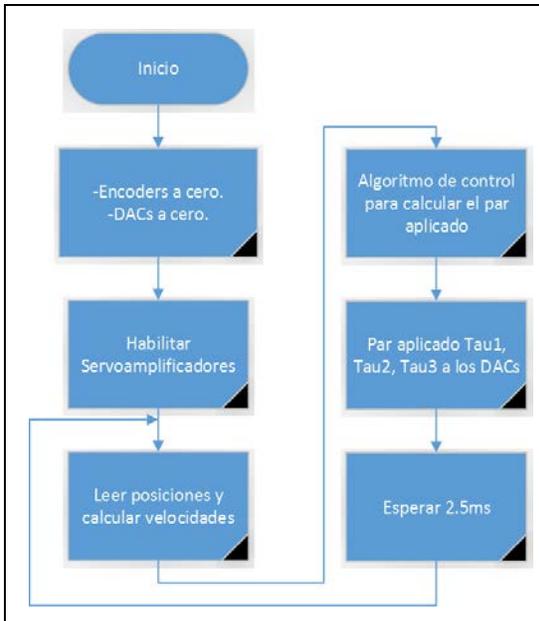


Fig. 3. Algoritmo general de la interfaz que controla el robot de 3gdl.

Este algoritmo fue programado en Visual C++, en una aplicación de consola Win32 donde se usaron librerías definidas por el fabricante y librerías usuales de Windows. Al iniciar el programa se limpian los encoders con funciones predefinidas por el fabricante, posteriormente se ponen los DACs a cero utilizando una función llamada mcWriteReg() que sirve para escribir en los registros del DSP. Después se habilitan los servo-amplificadores, se leen posiciones y se calculan velocidades para poder calcular los pares. Esto se realiza cada 2.5 ms utilizando el timer de la tarjeta LC228.

3. Controlador con ganancia variable

El objetivo de control de un robot manipulador consiste en encontrar una ley de control τ que proporcione los pares aplicados a las articulaciones del robot, de tal forma que mueva el extremo final de robot desde una posición inicial hasta una posición deseada. En términos formales se tiene lo siguiente:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \dot{q}(t) \\ \tilde{q}(t) \end{bmatrix} \rightarrow 0 \quad (1)$$

dónde:

- $\dot{q}(t)$ es la velocidad articular de movimiento.
- $\tilde{q}(t)$ es la diferencia entre la posición deseada q_d y la posición actual $q(t)$ del robot $\tilde{q}(t) = q_d - q(t)$.

La técnica más utilizada para controlar robots manipuladores se encuentra en la metodología de moldeo de energía, la cual fue propuesta por Arimoto en 1981 y perfeccionada por Santibáñez y Kelly mediante la generalización de una función estricta de Lyapunov [7]. Esta técnica consiste en proponer una función de energía artificial $u_a(K_p, \tilde{q})$ tal que:

$$\tau = \nabla u_a(K_p, \tilde{q}) - f_v(K_v, \dot{q}) + g(q) \quad (2)$$

Dónde:

- $\nabla u_a(K_p, \tilde{q}) = \frac{\partial u_a(K_p, \tilde{q})}{\partial \tilde{q}}$ representa el gradiente de la energía potencial.

- $u_a(K_p, \tilde{q})$ se conoce como la energía potencial artificial y es una energía de diseño.
- $f_v(K_v, \dot{q})$ representa el freno mecánico a través de la inyección de velocidad de movimiento.
- $g(q)$ es la compensación del par gravitacional.

Con esta técnica es posible implementar un gran número de controladores. Un ejemplo claro y muy común es el control proporcional derivativo.

El algoritmo de control proporcional derivativo (PD), es el esquema de control más común que existe hoy en día y que se aplica a robots manipuladores. La ecuación en lazo cerrado del modelo dinámico del robot manipulador y el control proporcional derivativo tiene un punto de equilibrio global y asintóticamente estable [8].

El controlador proporcional derivativo más compensación de gravedad está dado por la siguiente ecuación:

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

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_v es la ganancia derivativa o freno mecánico y finalmente el término $g(q)$ representando la compensación de gravedad.

El controlador PD puede modificarse a uno de los controles saturados más comunes.

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

En ambos controladores el diseñador se enfrenta a la sintonización de las ganancias, proceso que resulta tedioso en la mayoría de los casos. Una forma de enfrentar este problema consiste en proponer una función para K_p que dependa del error \tilde{q} . Una forma de poder proponer esta función es relacionando el par con el error de posición. Se sabe que mientras el error sea máximo, el controlador debe de proporcionar el par necesario máximo y cuando el error sea cercano a cero, el par es el mínimo o el suficiente para mantener las articulaciones en esa posición. De acuerdo a la relación anterior se propone la siguiente función para $K_p(\tilde{q})$.

$$K_p(\tilde{q}_i) = k_p^* (1 - \beta e^{-\beta \tilde{q}_i^2}) \quad (5)$$

Donde k_p^* y β son números reales positivos. La variable k_p^* es el par máximo deseado en el motor, β es una constante que mueve el rango de K_p y está acotada en $0 < \beta < 1$.

La ganancia K_v es posible relacionarla con la velocidad, debido a que en el freno mecánico reacciona de acuerdo a la inyección de \dot{q} . Por lo tanto, utilizando la estructura anterior se propone lo siguiente:

$$K_v(\dot{q}_i) = k_v^* (1 - \alpha e^{-\alpha \dot{q}_i^2}) \quad (6)$$

Donde $0 < \alpha < 1$. Tomando en cuenta las propuestas de sintonía mencionadas anteriormente, el controlador (4) toma la siguiente forma:

$$\tau = K_p(\tilde{q}) \tanh(\tilde{q}) - K_v(\dot{q}) \tanh(\dot{q}) + g(q) \quad (7)$$

Mientras que la estructura del modelo dinámico del robot de 3 gdl es el siguiente:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + g(q) + f_f(\dot{q}, f_e) \quad (8)$$

La ecuación en lazo cerrado formada por el modelo dinámico y con la estructura de control genera un punto de equilibrio estable global en el sentido de Lyapunov, esta ecuación esta expresada de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\tilde{q}} \\ M(q)^{-1} [K_p(\tilde{q}) \tanh(\tilde{q}) - K_v(\dot{\tilde{q}}) \tanh(\dot{\tilde{q}}) - B\dot{\tilde{q}} - C(q, \dot{\tilde{q}})\dot{\tilde{q}}] \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde el punto de equilibrio existe y es único.

La demostración de estabilidad del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado (9) en el sentido de Lyapunov queda de la siguiente forma:

Proponiendo la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\tilde{q}}^T M(q) \dot{\tilde{q}} + \int_0^{\tilde{q}} \tanh(\tilde{q})^T K_p(\tilde{q}) d\tilde{q} \quad (10)$$

Donde el primer término es definido positivo debido a que la energía cinética $M(\mathbf{q})$ es definida positiva. El segundo término es la energía potencial artificial, por diseño es definido positivo, por lo tanto la función $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}})$ es definida positiva.

La derivada temporal de la función de energía (10) se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) = \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T M(\mathbf{q})\ddot{\tilde{\mathbf{q}}} + \frac{1}{2}\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \dot{M}(\mathbf{q})\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \tanh(\tilde{\mathbf{q}})^T K_p(\tilde{\mathbf{q}})\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (11)$$

$$= \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_p(\tilde{\mathbf{q}}) \tanh(\tilde{\mathbf{q}}) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_v(\dot{\tilde{\mathbf{q}}}) \tanh(\dot{\tilde{\mathbf{q}}}) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T B\dot{\tilde{\mathbf{q}}} - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \frac{1}{2}\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \dot{M}(\mathbf{q})\dot{\tilde{\mathbf{q}}} - \tanh(\tilde{\mathbf{q}})^T K_p(\tilde{\mathbf{q}})\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (12)$$

Considerando la propiedad de antisimetría [9] $\frac{1}{2}\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T [\dot{M}(\mathbf{q}) - 2C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})]\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = 0$ del modelo dinámico y cancelando términos se demuestra lo siguiente:

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}) = -\dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T K_v(\dot{\tilde{\mathbf{q}}}) \tanh(\dot{\tilde{\mathbf{q}}}) - \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T B\dot{\tilde{\mathbf{q}}} \leq 0 \quad (13)$$

Cumpliendo con el teorema de estabilidad de Lyapunov, quedando demostrada la estabilidad del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado (9).

4. Análisis de resultados

Después de la teoría mostrada anteriormente, se mostrarán los resultados experimentales obtenidos de la plataforma experimental mencionada al inicio. Las funciones implementadas para las ganancias proporcionales son las siguientes:

$$\begin{aligned} K_{p1}(\tilde{q}_1) &= 15(1-0.9)e^{-0.9\tilde{q}_1^2} \text{Nm} \\ K_{p2}(\tilde{q}_2) &= 29(1-0.1)e^{-0.1\tilde{q}_2^2} \text{Nm} \quad (14) \\ K_{p3}(\tilde{q}_3) &= 2.027(1-0.8)e^{-0.8\tilde{q}_3^2} \text{Nm} \end{aligned}$$

Y para las ganancias derivativas se propone las siguientes funciones:

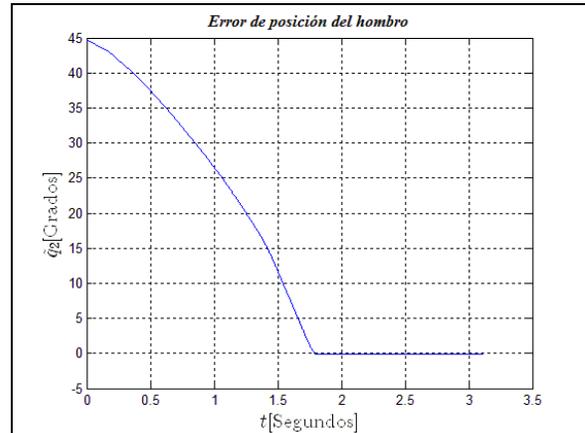
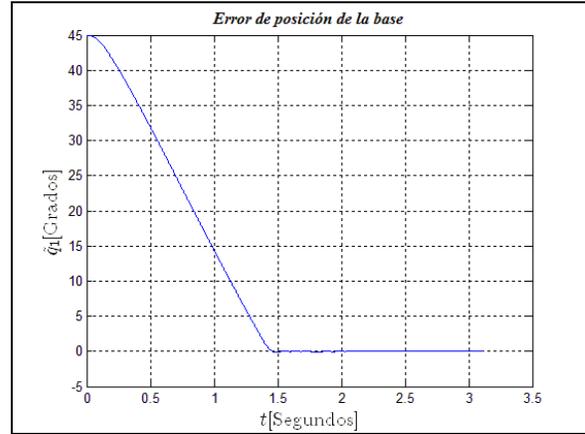
$$K_{v1}(\dot{q}_1) = 13.5(1-0.9)e^{-0.9\dot{q}_1^2} \text{Nm}$$

$$K_{v2}(\dot{q}_2) = 20.22(1-0.1)e^{-0.1\dot{q}_2^2} \text{Nm} \quad (15)$$

$$K_{v3}(\dot{q}_3) = 1.7(1-0.1)e^{-0.1\dot{q}_3^2} \text{Nm}$$

Usando las funciones anteriores, se implementa el regulador (7) a las siguientes posiciones deseadas; $q_{d1} = 45^\circ$, $q_{d2} = 45^\circ$, $q_{d3} = 45^\circ$.

A partir de la implementación se obtienen los resultados para los errores de posición. En la figura 4, 5, 6 se muestran el error de posición de la base, hombro y codo del robot de 3gdl respectivamente. En estas figuras se observa que el error de posición tiende a cero.



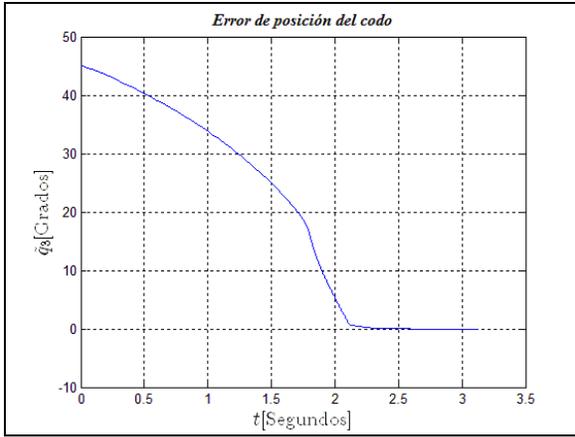


Fig. 6. Error de posición del codo.

El tiempo del estado transitorio del error de posición depende en gran medida de la función propuesta para dichas ganancias.

Las variaciones de las ganancias proporcionales son mostradas en las figuras 7, 8 y 9.

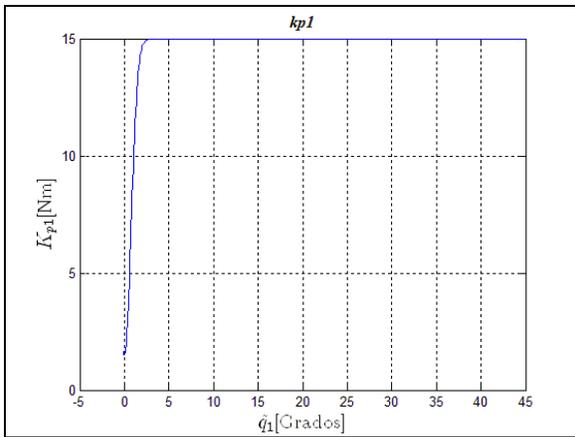


Fig. 7. Ganancia proporcional de la base.

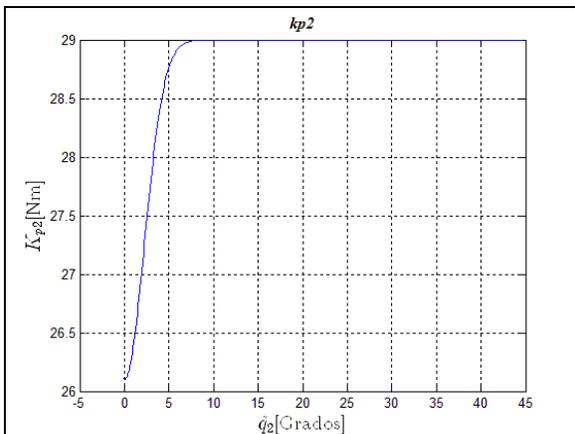


Fig. 8. Ganancia proporcional del hombro.

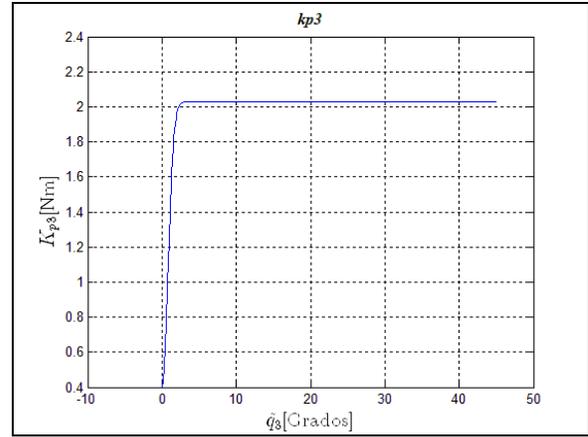


Fig. 9. Ganancia proporcional del codo.

En las figuras 7,8 y 9 se muestra la variación de las ganancias proporcionales donde se observa que después de un tiempo, estas toman un valor constante, debido a que el error de posición tiende a cero.

La variación de las ganancias derivativas se observa en las figuras 10,11 y 12.

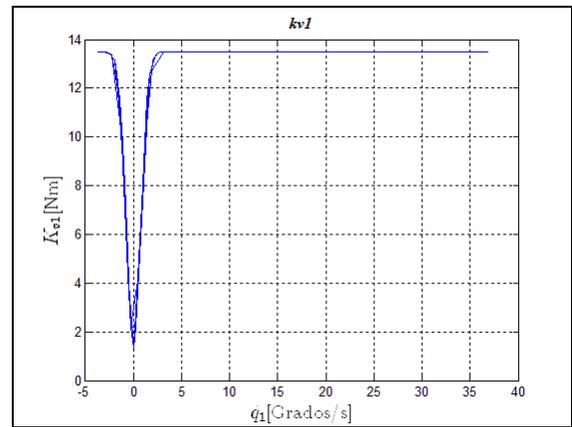


Fig. 10. Ganancia derivativa de la base.

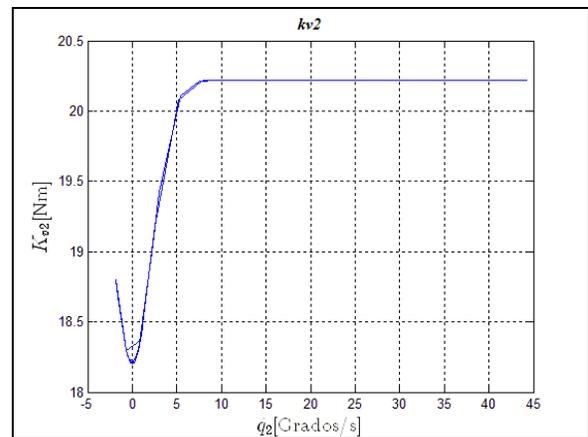


Fig. 11. Ganancia derivativa del hombro.

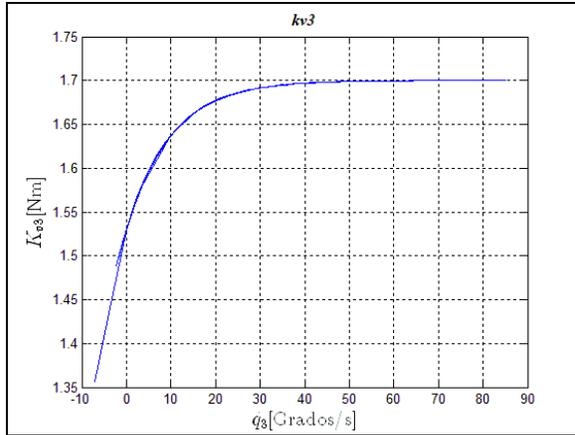


Fig. 12. Ganancia derivativa del codo.

La variación de la ganancia derivativa depende de la velocidad, en las figuras 10, 11 y 12 se observa un cambio al inicio, después la ganancia toma un valor constante, éste valor se mantiene mientras la velocidad es constante, posteriormente la velocidad tiene a disminuir, significando que el robot está llegando a su posición deseada llevando la ganancia derivativa a otro valor numérico.

Este tipo sintonización permite realizar movimientos suaves en las articulaciones del robot, ya que la ganancia proporcional y derivativa se mueve dependiendo del error de posición y de la velocidad de movimiento.

5. Conclusiones

La propuesta de la ganancia variable evita procesos tediosos y empíricos en la sintonía de dichas ganancias. El desempeño del controlador, depende en gran medida de la propuesta de las funciones que describen las ganancias.

Utilizando la técnica de moldeo de energía, existe un gran número de familias donde se puede aplicar ganancias variables. De la misma forma existen muchas familias para analizar experimentalmente en el robot de 3 gdl. Por lo que aún queda abierto el problema de sintonía de ganancias.

En el trabajo futuro se pretende mejorar el desempeño del controlador proponiendo nuevas funciones de sintonía y evaluando dichas ganancias en aplicaciones prácticas, como pintado o traslado de objetos. También se pretende realizar comparaciones tecnológicas entre Robots industriales y el robot de nuestra plataforma experimental, utilizando ganancias variables.

Referencias

- [1] Arimendariz J., Parra V., García R., Hirai S., "Dynamic Self-Tuning PD Control for Tracking of Robot Manipulators", 51st IEEE Conference on Decision and Control, IEEE, pp. 1172-1179, Maui Hawaii, 2012
- [2] Huafei X., Shaoping W., "Auto-tuning PID module of robot motion system", Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 6th IEE Conference on, pp. pages 668-673, Beijing, 2011
- [3] Farzin P., N. sulaiman, Sadeq A., Mohammadali D., Abbas Z., "Position Control of Robot Manipulator: Design a Novel SISO Adaptive Sliding Mode Fuzzy Sliding Mode Control", International Journal of Artificial Intelligence and Expert System, Vol 2, pp. pages 208-228, Malaysia, 2011
- [4] Xin P., Bihuan C., Yijun Y., Wenyun Z., "Self-tuning of Software through Goal-based Feedback Loop Control", 18th IEEE International Requirements Engineering Conference, pp. pages 104-107, Sydney Australia, 2010
- [5] Reyes F., "Robótica Control de Robots Manipuladores", Alfaomega, México, Primera edición, 2011.
- [6] PMDI. PrecisionMicroDynamics, *LC228 User Manual, Hardware Installation, Software Driver Installation, Register Access C-Library*, 2007.
- [7] Santibañez V., Kelly R., Reyes F., "Strict Lyapunov functions for control of robot manipulators", Automatica, Vol 33, No. 4, pp. pages 675-682, 1997
- [8] Kelly R., Santibañez V., Loria A., "Control of Robot Manipulators in Joint Space", Springer-Verlag, México, Primera edición, 2005.
- [9] Sánchez P. Reyes F., López A., Jiménez C., "Demostración Matemática Controlador Jacobiano Transpuesto y de la propiedad de Antisimetría.", 4º Congreso Nacional de Mecatrónica, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., Universidad Tecnológica de Coahuila, 2005