

Análisis de un regulador PID lineal para el control de robots manipuladores

M.I. Nava-Bustamante¹, J.L. Meza Medina¹.

Resumen— El regulador proporcional-integral-derivativo (PID) lineal para robots manipuladores es considerado como el controlador más popular debido a su estructura simple y su efectividad demostrada para el control de posición. Desafortunadamente el control PID lineal carece hasta hoy de una prueba de estabilidad asintótica global. Las pruebas de estabilidad hasta hoy presentadas son válidas solo en un sentido local o semiglobal. En este trabajo de investigación, se presenta un análisis de estabilidad asintótica semiglobal simple del regulador PID lineal para robots manipuladores, el cual es resultado de una adecuada combinación de resultados previos donde se utilizó teoría de pasividad y teoría de Lyapunov.

Palabras claves—Control de robots, PID, estabilidad de Lyapunov.

Abstract— The linear proportional-integral-derivative (PID) regulator for robot manipulators is considered the most popular controller due to its simple structure and proven demonstration for position control. Unfortunately, linear PID control lacks a global asymptotic stability test to date. Stability tests to date are valid only in a local or semi-global sense. In this research paper, a simple semi-global asymptotic stability analysis of the linear PID regulator for robot manipulators is presented, which is the result of a suitable adequate combination of previous results where passivity theory and Lyapunov theory are applied.

Keywords— Control of robots, PID, Lyapunov stability.

I. INTRODUCCIÓN

El regulador PID para robots manipuladores aun es considerado como el regulador más popular para el control de posición de robots manipuladores, debido a su estructura simple y su fácil implementación. Sin embargo, el control PID no cuenta con un adecuado fundamento teórico al carecer hasta hoy de una prueba de estabilidad asintótica global. Las pruebas de estabilidad asintótica hasta hoy presentadas son válidas solo en un sentido local [1]-[3] y en el mejor de los casos semiglobal [13],[15]. Las pruebas de estabilidad asintótica local reportadas son demasiado complicadas. Recientemente se han propuesto

reguladores globalmente estables para resolver el problema de posicionamiento global llamados PID no lineales [6], [8], [12], [16].

Este trabajo está inspirado por trabajos previos, [2], [4], [6] mediante la adecuada combinación de las funciones de Lyapunov presentadas en dichos trabajos, logrando presentar un análisis de estabilidad semiglobal del regulador PID lineal para robots manipuladores más simple.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En esta sección se describe el trabajo realizado para el análisis del regulador PID clásico y su aplicación en robots manipuladores. Se muestra detalladamente la obtención del modelo dinámico del robot, el diseño del controlador y su respectivo análisis de estabilidad.

A. Modelo dinámico del robot

Despreciando el fenómeno de fricción y otras perturbaciones, la dinámica de un robot rígido de n eslabones puede ser escrito como, [5]:

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

donde q es el vector de $n \times 1$ de posiciones articulares, τ es el vector de $n \times 1$ de pares aplicados a las articulaciones, $M(q)$ es la matriz de inercia del manipulador definida positiva y simétrica de $n \times n$, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis de $n \times 1$, y $g(q)$ es el vector de fuerzas gravitacionales de $n \times 1$ obtenido como el gradiente de la energía potencial del robot $U(q)$ debido a la acción de la gravedad con

$$g(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial(q)}. \quad (2)$$

Para este artículo se supone que los eslabones del robot están unidos por articulaciones rotacionales. La ecuación representativa de la dinámica del manipulador es compleja, sin embargo, cuenta con varias propiedades fundamentales que pueden ser aprovechadas para su análisis. Tres propiedades importantes se muestran a continuación:

Propiedad 1. [10] La matriz $C(q, \dot{q})\dot{q}$ y la derivada

¹ Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, línea de investigación Mecatrónica y Control. Torreón, Coahuila, México. navabustamantem@gmail.com

temporal $\dot{M}(q)$ de la matriz de inercia satisfacen:

$$\dot{q}^T \left[\frac{1}{2} \dot{M}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} = 0 \quad \forall q, \dot{q} \in \mathbb{R}^n.$$

Propiedad 2. [10] Existe una constante positiva k_g tal que

$$k_g \geq \left\| \frac{\partial g(q)}{\partial q} \right\| \quad \forall q \in \mathbb{R},$$

y

$$\|g(x) - g(y)\| \leq k_g \|x - y\| \quad \forall x, y \in \mathbb{R}^n$$

Propiedad 3. [10] Existe una constante positiva k_c tal que para toda $x, y, z \in \mathbb{R}^n$ tenemos que

$$\|C(x, y)z\| \leq k_c \|y\| \|z\|.$$

B. Robot experimental

Con el fin de soportar el desarrollo teórico, se consideró un robot manipulador de dos grados de libertad moviéndose en el plano vertical. El sistema consiste de un brazo robótico de transmisión directa con dos eslabones rígidos y articulaciones rotacionales, el cual se muestra en la Figura 1. Este sistema se encuentra en el laboratorio de mecatrónica y control del Tecnológico Nacional de México campus La Laguna.



Figura 1. Robot experimental de dos grados de libertad

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del robot, cuya nomenclatura representa los parámetros de principal interés del manipulador, los cuales se incluyen en la tabla 1. El motor del eslabón 1 es capaz de suministrar un par de 200 Nm y el motor del eslabón 1 solo 15 Nm,

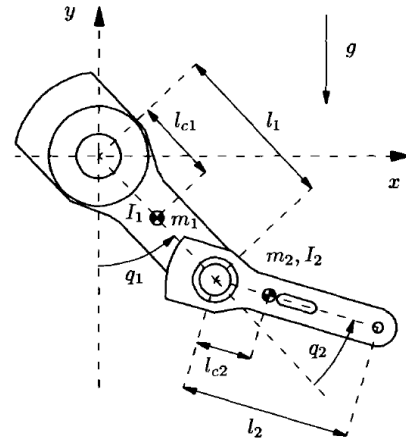


Figura 2. Diagrama esquemático del robot manipulador

TABLA I PARÁMETROS DEL ROBOT MANIPULADOR EXPERIMENTAL

		valor	unidades
Longitud del eslabón 1	l_1	0.45	m
Longitud del eslabón 2	l_2	0.45	m
Centro de masa del eslabón 1	l_{c1}	0.091	m
Centro de masa del eslabón 2	l_{c2}	0.048	m
masa del eslabón 1	m_1	23.902	kg
masa del eslabón 2	m_2	3.88	kg
Inercia del eslabón 1	I_1	1.266	Kg m ² /rad
Inercia del eslabón 2	I_2	0.093	Kg m ² /rad
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²
Fricción viscosa de la articulación 1	f_{v1}	2.288	Nm-s/rad
Fricción viscosa de la articulación 2	f_{v2}	0.175	Nm-s/rad

C. Regulador lineal PID clásico

En la actualidad la mayoría de los robots industriales son controlados mediante reguladores PID [7] (ver figura

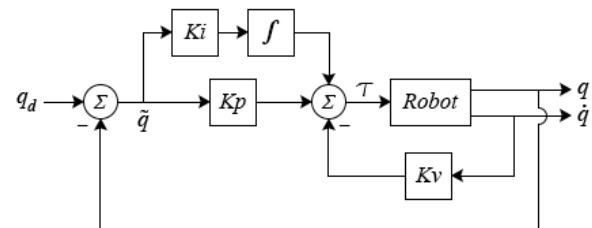


Figura 3. Regulador lineal PID clásico

3).

La ley de control del regulador PID puede representarse mediante la ecuación

$$\tau = k_p \tilde{q} - k_v \dot{\tilde{q}} + k_i \int_0^t \tilde{q}(\sigma) d\sigma \quad (3)$$

donde

- k_p, k_v y k_i son matrices diagonales definidas

positivas de $n \times n$

- $\tilde{q} = q_d - q$ es el vector de error de velocidad.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ z \end{bmatrix} =$$

Con propósitos de análisis la ley de control (3) puede ser reescrita equivalentemente de la siguiente forma:

$$\tau = k'_p \tilde{q} - k_v \dot{\tilde{q}} + k'_i \int_0^t (\alpha \tilde{q}(\sigma) + \dot{\tilde{q}}(\sigma)) d\sigma \quad (4)$$

donde

$$k'_p = k_p - \frac{k_i}{\alpha} \quad (5)$$

$$k'_i = \frac{k_i}{\alpha} \quad (6)$$

con

$$\alpha > \frac{\lambda_M \{k_i\}}{\lambda_m \{K_p\}} \quad (7)$$

Esta última condición asegura que $k'_p > 0$. La constante α se utiliza como parámetro de la función de Lyapunov, por lo que se debe elegir adecuadamente. Es importante tener presente que no es un parámetro del controlador.

La ecuación de lazo cerrado del sistema se obtiene sustituyendo la ley de control (4) en la dinámica del robot (1). Representando en ecuaciones de estado se tiene

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \xi \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [k'_p \tilde{q} - k_v \dot{\tilde{q}} - C(q, \dot{q}) \dot{\tilde{q}} - g(q) + k_i \xi] \\ \alpha \tilde{q} - \dot{q} \end{bmatrix}$$

donde $\xi = \int_0^t (\alpha \tilde{q}(\sigma) + \dot{\tilde{q}}(\sigma)) d\sigma$. El único equilibrio se localiza en

$$\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_i^{-1} g(q_d) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para mover el equilibrio al origen se hace un cambio de variable definiendo z como:

$$z(t) = \xi - k_i^{-1} g(q_d) \quad (10)$$

$$\dot{z}(t) = \alpha \tilde{q}(t) - \dot{q}(t) \quad (12)$$

La ecuación de lazo cerrado en términos de z queda

$$\begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [k'_p \tilde{q} - k_v \dot{\tilde{q}} - C(q, \dot{q}) \dot{\tilde{q}} - g(q) + k'_i z + g(q_d)] \\ \alpha \tilde{q} - \dot{q} \end{bmatrix}$$

La cual es una ecuación diferencial no lineal autónoma cuyo origen $[\tilde{q}^T \quad \dot{\tilde{q}}^T \quad z^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{3n}$ es el único equilibrio.

D. Análisis de estabilidad

Para llevar a cabo el análisis de estabilidad, se hará uso de la siguiente función candidata de Lyapunov, la cual es resultado de una adecuada combinación de las funciones propuestas en [9] y [4]:

$$\begin{aligned} V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, z) &= \frac{1}{2} \dot{\tilde{q}}^T M(q) \dot{\tilde{q}} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T k'_p \tilde{q} + \mathcal{U}(q) \\ &\quad - \mathcal{U}(q_d) + g(q_d)^T \tilde{q} - \alpha \tilde{q}^T M(q) \dot{\tilde{q}} \\ &\quad + \frac{1}{2} z^T k'_i z + \frac{\alpha}{2} \tilde{q}^T k_v \tilde{q} \end{aligned} \quad (13)$$

Buscando otorgar las condiciones necesarias para que $V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, z)$ sea definida positiva, se particiona la función $V(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, z)$ como $V = V_1 + V_2 + V_3$ donde

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{q}^T k'_p \tilde{q} + \mathcal{U}(q) - \mathcal{U}(q_d) + g(q_d)^T \tilde{q}$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \dot{\tilde{q}}^T M(q) \dot{\tilde{q}} - \alpha \tilde{q}^T M(q) \dot{\tilde{q}} + \frac{\alpha}{2} \tilde{q}^T k_v \tilde{q}$$

$$V_3 = \frac{1}{2} z^T k'_i z$$

V_1 será definida positiva si: $\lambda_m \{k'_p\} > k_g$ [11]. Para alcanzar esta condición en términos de k_p en lugar de k'_p se sustituye (5) en V_1 y con ello se obtiene que $V_1 > 0$ si

$$\lambda_m \{k_p\} - k_g - \frac{1}{\alpha} \lambda_M \{k_1\} > 0.$$

Con ello se obtiene la cota inferior sobre α

$$\alpha > \frac{\lambda_M \{k_1\}}{\lambda_m \{k_p\} - k_g}. \quad (15)$$

Nótese que la satisfacción de (15) con $\lambda_m \{k_p\} - k_g$ también satisface (7).

Utilizando las siguientes desigualdades

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} &\geq \frac{1}{2} \lambda_m\{M\} \|\dot{q}\|^2 \\ -\alpha \tilde{q}^T M(q) \dot{q} &\geq -\alpha \lambda_M(M) \|\tilde{q}\| \|\dot{q}\| \\ \frac{\alpha}{2} \tilde{q}^T k_v \tilde{q} &\geq \frac{\alpha}{2} \lambda_m\{k_v\} \|\tilde{q}\|^2 \end{aligned}$$

se obtiene la siguiente expresión para V_2 .

$$V_2 \geq \frac{\alpha}{2} \begin{bmatrix} \|\dot{q}\| \\ \|\tilde{q}\| \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\lambda_m\{M\}}{\alpha} & -\lambda_M\{M\} \\ -\lambda_M\{M\} & \lambda_m\{k_v\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|\dot{q}\| \\ \|\tilde{q}\| \end{bmatrix}$$

la cual será definida positiva si

$$\frac{\lambda_m\{M\} \lambda_m\{k_v\}}{\lambda_M^2\{M\}} > \alpha. \quad (16)$$

V_3 es definida positiva en z debido a (6), esto es porque k_i es elegida de forma diagonal y definida positiva. La función candidata de Lyapunov será definida positiva globalmente bajo la condición

$$\lambda_m\{k_p\} > k_g \quad (17)$$

con α seleccionado de tal forma para satisfacer

$$\frac{\lambda_m\{M\} \lambda_m\{k_v\}}{\lambda_M^2\{M\}} > \alpha > \frac{\lambda_M\{k_i\}}{\lambda_m\{k_p\} - k_g}. \quad (18)$$

Derivando la función candidata de Lyapunov se obtiene

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z) = & \dot{q}^T \{k'_p \tilde{q} - k_v \dot{q} - C(q, \dot{q}) \dot{q} - g(q) + k'_i z + g(qd)\} \\ & + \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - \dot{q}^T k'_p \tilde{q} \\ & - \alpha \tilde{q}^T \{k'_p \tilde{q} - k_v \dot{q} - C(q, \dot{q}) \dot{q} - g(q) + k'_i z + g(qd)\} \\ & - \alpha \tilde{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} + \alpha \dot{q}^T M(q) \dot{q} + g(q)^T \dot{q} \\ & - g(q_d)^T \dot{q} + z^T k'_i \dot{z} - \alpha \tilde{q}^T k_v \dot{q} \end{aligned}$$

Eliminando términos para simplificar la función ahora en términos de k_p se obtiene

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z) = & -\dot{q}^T k_v \dot{q} - \alpha \tilde{q}^T C(q, \dot{q})^T \dot{q} - \alpha \tilde{q}^T \left[k_p - \frac{k_i}{\alpha} \right] \tilde{q} \\ & - \alpha \tilde{q}^T [g(q_d) - g(q)]. \end{aligned}$$

Empleando las siguientes cotas

$$\begin{aligned} -\dot{q}^T k_v \dot{q} &\leq -\lambda_m\{k_v\} \|\dot{q}\|^2 \\ \alpha \dot{q}^T M(q) \dot{q} &\leq \alpha \lambda_M\{M\} \|\dot{q}\|^2 \\ -\alpha \tilde{q}^T C(q, \dot{q})^T \dot{q} &\leq \alpha k_c \|\tilde{q}\| \|\dot{q}\|^2 \\ -\alpha \tilde{q}^T k_p \tilde{q} &\leq -\alpha \lambda_m\{k_p\} \|\tilde{q}\|^2 \\ -\alpha \tilde{q}^T [g(q_d) - g(q)] &\leq \alpha k_g \|\tilde{q}\|^2 \\ \tilde{q}^T k_i \tilde{q} &\leq \lambda_M\{k_i\} \|\tilde{q}\|^2 \end{aligned}$$

con lo que se llega a:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z) &\leq -[\lambda_m\{k_v\} - \alpha \lambda_M\{M\} - \alpha k_c \|\tilde{q}\|] \|\dot{q}\|^2 \\ &\quad - [\alpha \lambda_m\{k_p\} - \alpha k_g - \lambda_M\{k_i\}] \|\tilde{q}\|^2 \quad (19) \end{aligned}$$

Procedemos a definir η como el radio de una bola abierta

$$D = \{x := [\tilde{q}^T \quad \dot{q}^T \quad z^T]^T \in \mathbb{R}^{3n}: \|x\| < \eta\}$$

tal que $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z) \leq 0$ en D . Esto nos servirá para estimar la región de atracción.

La derivada de la función de Lyapunov será negativa semidefinida si se encuentran condiciones sobre α en términos del radio η de la expresión siguiente:

$$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z) \leq -\alpha \begin{bmatrix} \|\dot{q}\| \\ \|\tilde{q}\| \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} \|\dot{q}\| \\ \|\tilde{q}\| \end{bmatrix}$$

donde

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_M\{k_v\}}{\alpha} - \lambda_M\{M\} - k_c \eta & 0 \\ 0 & \lambda_m\{k_p\} - k_g - \frac{\lambda_M\{k_i\}}{\alpha} \end{bmatrix}.$$

Las siguientes condiciones permiten asegurar que $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z)$ sea definida negativa en la región $D \subset \mathbb{R}^{3n}$:

$$\lambda_M\{k_v\} > \alpha [\lambda_M\{M\} + k_c \eta] \quad (21)$$

$$\lambda_m\{k_p\} > k_g + \frac{\lambda_M\{k_i\}}{\alpha} \quad (22)$$

α debe satisfacer

$$\frac{\lambda_M\{k_v\}}{\lambda_M\{M\}+k_c\eta} > \alpha > \frac{\lambda_M\{k_i\}}{\lambda_M\{k_p\}-k_g} \quad (23)$$

Eligiendo α al que satisfaga (23) se garantiza que $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z)$ sea una función semidefinida negativa en una bola D de radio η . Ahora haciendo uso del principio de invarianza de LaSalle se puede probar la estabilidad asintótica del origen del espacio de estado con una estimación de la región de atracción. Para estimar de forma simple el dominio de atracción $\Omega_c \subset D$ es proporcionado por el conjunto [14]:

$$\Omega_c = \left\{ x \in \mathbb{R}^{3n}: V(x) < c = \min_{\|x\|=\eta} V(x) \right\}$$

El tamaño de la región de atracción depende del radio η de la región D .

En resumen las condiciones que necesitan ser satisfechas simultáneamente por la constante α para que $V(\tilde{q}, \dot{q}, z) > 0$ globalmente y $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}, z) \leq 0$ en una región $D \subset \mathbb{R}^{3n}$ son:

$$\min \left\{ \frac{\lambda_m\{M\}\lambda_m\{k_v\}}{\lambda_M^2\{M\}}, \frac{\lambda_m\{k_v\}}{\lambda_M\{M\} + k_c\eta} \right\} > \alpha > \frac{\lambda_M\{k_i\}}{\lambda_M\{k_p\} - k_g}$$

Además k_p debe satisfacer

$$\lambda_m\{k_p\} > k_g.$$

III. RESULTADOS

Para verificar la correcta aplicación del regulador PID clásico a un robot manipulador de dos grados de libertad, se realizaron una serie de simulaciones considerando los parámetros del robot experimental. Los parámetros de sintonización considerados se encuentran en [17].

En la Figura 4 se muestra las gráficas de posición para los eslabones del manipulador. Se consideró establecer una posición deseada de 90 grados para el eslabón 1 y de 45 grados para el eslabón 2. Puede observarse que dichas referencias son alcanzadas en un tiempo de 3 segundos aproximadamente, siendo un buen resultado de regulación.

A su vez, en la Figura 5 se puede observar que los errores de posición tienden a cero grados en un corto periodo de tiempo, por lo cual el sistema se comporta de forma óptima ante la tarea asignada de alcanzar una posición predeterminada,

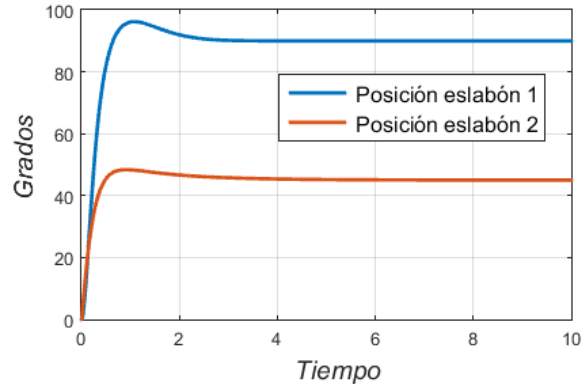


Figura 4. Posiciones angulares de los eslabones del robot

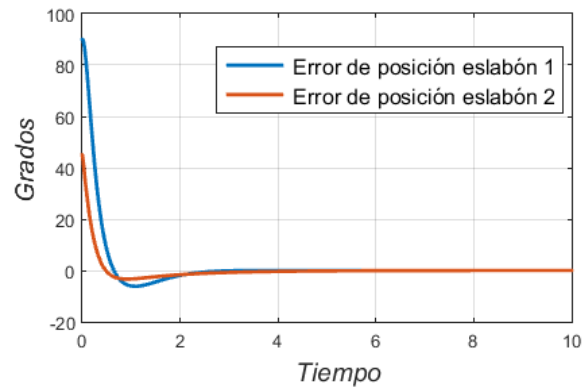


Figura 5. Errores de posición de los eslabones del robot

Es importante recordar que el motor del eslabón 1 es capaz de suministrar un par de 200 Nm y el motor del eslabón 2 solo 15 Nm, por lo cual estos serán los torques límites que pueden ser aplicados. En la Figura 6 se muestra la gráfica con los pares aplicados a los eslabones, donde se puede observar que estos valores están dentro del rango.

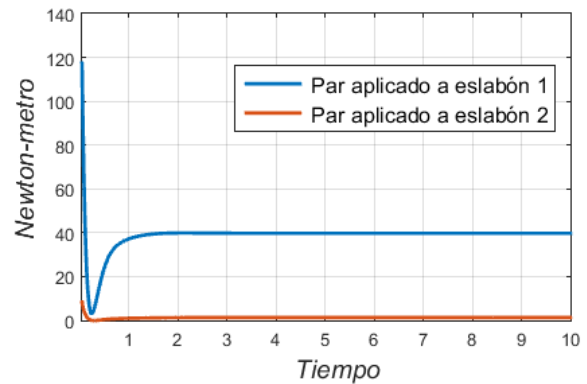


Figura 6. Pares aplicados a los eslabones del robot

El análisis de estabilidad presentado en este trabajo ha permitido comprobar la siguiente proposición.

Proposición 1. Considere la ley de control PID lineal (3) en lazo cerrado con la dinámica del robot (1), bajo la condición de que $\lambda_m\{k_p\} > k_g$, existirán adecuadas matrices de ganancias proporcional k_p , derivativa k_v e integral k_i tal que el equilibrio $[\tilde{q}^T \ \dot{q}^T \ z^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{3n}$ del sistema en lazo cerrado (13) es semiglobal y asintóticamente estable, en el sentido de que el estimado del dominio de atracción dado por

$$\Omega_c = \left\{ x \in \mathbb{R}^{3n} : V(x) < c = \min_{\|x\|=\eta} V(x) \right\}$$

Puede ser arbitrariamente agrandado con una adecuada selección de las ganancias del controlador. Una función de Lyapunov para probarlo está dada por:

$$\begin{aligned} V(\tilde{q}, \dot{q}, z) = & \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T k'_p \tilde{q} + \mathcal{U}(q) \\ & - \mathcal{U}(q_d) + g(q_d)^T \tilde{q} - \alpha \tilde{q}^T M(q) \dot{q} \\ & + \frac{1}{2} z^T k'_i z + \frac{\alpha}{2} \tilde{q}^T k_v \tilde{q}. \end{aligned}$$

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un enfoque simplificado para probar estabilidad asintótica semiglobal del regulador PID para robots manipuladores. Dicho enfoque fue inspirado en base a la interpretación de la teoría de pasividad [4], [6] y la teoría de Lyapunov [2]. La función de Lyapunov propuesta para el análisis de estabilidad es una combinación de funciones de Lyapunov utilizadas en [4] y [2]. Además fueron realizadas simulaciones para soportar los resultados obtenidos teóricamente.

REFERENCIAS

[1] J.T. Wen y S. Murphy (1990). "PID control for robot manipulators", CIRSSSE Document 54, Rensselaer Polytechnic Institute.

[2] R. Kelly (1995). "A Tuning procedure for stable PID control of robot manipulators", *Robotica*, Vol. 13, Part 2, pp. 141 - 148.

[3] S. Arimoto and F. Miyazaki (1984), "Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulators of sensory capability", (M. Brady and R.P. Paul, Eds.), The MIT Press, Cambridge, Mass., pp. 783- 799.

[4] R. Ortega, A. Lorfa, P. Nicklasson y H. Sira-Ramirez (1998). "Passivity- based Control of Euler—Lagrange systems", Springer—Verlag.

[5] Spong M. and M. Vidyasagar (1989). *Robot Dynamics and Control*, John Wiley and Sons,

[6] S. Arimoto, T. Naniwa, V. Parra Vega y L.L. Whitcomb (1994). "A quasi—natural potential and its role in design of hyper—stable PID servo—loop for robotic systems", *Proceedings of the CAI Pacific Symposium '94*, Hong Kong.

[7] S. Arimoto (1995). "Fundamental problems of robot control: Part I, Innovations in the realm of robot servo—loops", *Robotica*, Vol. 13, pp. 19-27.

[8] R. Kelly (2008). "Global positioning of robot manipulators via PD control plus a class of nonlinear integral actions", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol 43.

[9] R. Kelly (2013). "Comments on "Adaptive PD controller for robot manipulator" ", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No.1, 117-119.

[10] Koditschek D (1984). "Natural motion for robot arms", *Proc. IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, NV, 733-735.

[11] Kelly R. (1997). "PD Control with Desired Gravity Compensation of Robotic Manipulators: A Review ". *The International Journal of Robotics Research*, vol. 16, No.5, pp.660 – 672.

[12] V. Santibañez y R. Kelly (1998). "A Class of Nonlinear PID global Regulators for robot manipulators", *IEEE Conference on Robotics and Automation*, Leuven Belgiu.

[13] Jose Alvares R. y Cervantes (1997). "Semiglobal PID Positioning of Robot manipulators", *ler. Congreso de Robótica de la Asociación Mexicana de Robótica, A.C.*

[14] H. Khalil (1996). "Nonlinear Systems", Prentice Hall.

[15] R. Ortega, A. Loria y R. Kelly (1995). "A semiglobally stable output feedback PID regulator for robot manipulators", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 40, No. 8, 1432-1436.

[16] J. Luis Meza y V. Santibañez (2009). "Analysis via passivity theory of a class of nonlinear PID global regulators for robot manipulators", *Proceeding of the TASTED International Conference, Robotics and Applications RA'99*, Santa Barbara, California. U.S.A. pp 288-293.

[17] J. Luis Meza y V. Santibañez (2003). "Sintonización del regulador PID semiglobal para robots manipuladores", *SIIEE 2003 Simposium Internacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica 2003*, Torreón, Coahuila, México.

BIOGRAFÍA

Nava Bustamante Mario Ivan. Nació en la ciudad de Gómez Palacio, Durango, el 18 de Enero de 1995. Obtuvo el grado de Ingeniero Electromecánico con especialidad en Automatización en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo en Diciembre de 2017. Actualmente se encuentra realizando sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Tecnológico Nacional de México campus La Laguna, en la línea de investigación de Mecatrónica y Control.

Cuenta con experiencia en la automatización y control de líneas de producción industriales. Sus áreas de interés son el control de robots y sistemas mecatrónicos y electromecánicos, automatización, instrumentación industrial y análisis matemáticos.

José Luis Meza Medina. Nació en la ciudad de Torreón, Coahuila. Obtuvo el grado de Ingeniero Electrónico con especialidad en Automatización en el Instituto Tecnológico de La Laguna. Cuenta con Posdoctorado en Ingeniería Eléctrica como máximo grado de estudios. Actualmente se desempeña como Profesor Investigador de tiempo completo en la División de Estudios de Posgrado e Investigación en el Tecnológico Nacional de México campus La Laguna.

Sus áreas de interés son el control de robots, análisis de estabilidad y teoría de Mecatrónica y Control.

