

Control de posición de miembros superiores de un robot antropomórfico: una fusión de CLF y observadores de EE.

J. Morones-Reyes* J.F. Guerrero-Castellanos*
E. M. Soto-García* J. Linares-Flores**

* Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, México (e-mail: morones.201010549@gmail.com, fermi.guerrero@correo.buap.mx, emilio.soto@correo.buap.mx)

** Instituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, (email:jlinares@mixteco.utm.mx)

Resumen: En este trabajo se presenta una propuesta de control de posición para un brazo robótico antropomórfico de cuatro grados de libertad (GDL) totalmente actuado. La estrategia propuesta sigue la filosofía general del control por rechazo activo de perturbaciones. Se desarrolló el modelo dinámico completo del sistema y se asume que el vector de Coriolis, el vector de pares gravitacionales, así como un vector de perturbaciones externas (fricciones y perturbaciones del medio ambiente) son desconocidos. Así entonces, se propone un observador de estado extendido (OEE) que permite estimar la velocidad angular en cada eslabón, así como los términos desconocidos. El control de retroalimentación se diseñó basándose en el concepto de Función de Lyapunov de Control (CLF) y la fórmula general de Sontag para la estabilización de sistemas no lineales afín a la entrada, lo cual aporta características importantes de robustez. Resultados en simulación muestran el buen desempeño del sistema en lazo cerrado.

Keywords: Robot antropomórfico humanoide, brazo humanoide, Control con rechazo activo de perturbaciones (ADRC), Observador de estado extendido (OEE), Funciones de Lyapunov de control (CLF).

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los datos de la Federación Internacional de Robótica cada año hay una creciente demanda tanto de robots industriales como de robots de servicio (IFR (en línea)), mostrando una clara tendencia a automatizar y delegar actividades humanas a los robots. Debido a esta tendencia, desde hace varias décadas, existe un gran interés en el desarrollo de robots humanoides y en el estudio de la interacción humano - máquina. Los robots humanoides presentan características similares a los humanos para ser óptimos durante la ejecución de tareas en entornos y con herramientas diseñadas, en principio, para el mismo ser humano; desde tareas en estaciones espaciales, hasta trabajos de rescate o pesados. Los robots humanoides tiene la adaptabilidad para diferentes tareas de manipulación (Huo et al. (2012)), debido a que cuentan con dos brazos robóticos antropomórficos, sin embargo, estos presentan una serie de requisitos para ajustarse a estas necesidades, por ejemplo, deben tener una alta relación carga - peso pero sin dejar de lado la cinemática humana, la precisión y la seguridad.

Además, es importante mantener la apariencia humana y la antropometría (Rader et al. (2016)).

Algunos ejemplos de robots humanoides o estructuras de doble brazo humanoides se presentan en (Diftler et al. (2011); Ott et al. (2006); Asfour et al. (2013)). También es posible encontrar diseño mas robusto, de tipo industrial, con frecuencia presentes en tareas de pick-and-place, por ejemplos el sistemas de doble brazo industrial YuMi (ABB (en línea)) de la empresa ABB Robotics y BAXTER (Rethink Robotics (en línea)) desarrollado por la empresa Rethink Robotics. En (Rader et al. (2016)) se propone un diseño de brazo humanoide con 8 GDL, agregando una articulación de clavícula de hombro interior que otorga mayor espacio de trabajo.

Los brazos robóticos humanoides pueden verse como manipuladores robóticos, debido a que su modelo matemático procede de estos. Sin embargo, es bien sabido lo complicado que resulta modelar la dinámica de los manipuladores, debido a la presencia de no linealidades e incertidumbres en los parámetros (Villalobos-Chin and Santibáñez (2018)). En la práctica, la mayoría de los

sistemas están afectados por incertidumbres que no fueron consideradas en la dinámica inicial y por perturbaciones externas propias de los ambientes físicos. Estas realidades se han convertido en un gran reto para los sistemas de control, debido a que las estrategias de control convencionales, basados en modelos, no siempre dan buenos resultados y no son capaces de mantener el estado estable en estas condiciones. En consecuencia, se han desarrollado diferentes propuestas para tratar con el tema de las perturbaciones internas y externas, tales como: sistemas de control adaptativo, control de modo deslizante, redes neuronales o control difuso, por mencionar algunas. No obstante, no consiguieron resolver el problema particular de la retransmisión de las perturbaciones (Abdallah and Fareh (2019)). Otro camino es la aplicación de un observador de perturbaciones (DOB), ver (Bae and Jung (2012)), junto con la ley de control. En este caso se logra un mejor rendimiento del seguimiento de posición gracias al DOB pero el inconveniente es la necesidad de conocer perfectamente el modelo y un sensor extra para medir la aceleración, que lo convierte en más costoso y difícil de implementar.

Como respuesta a la necesidad de un control que estime las incertidumbres del sistema y las perturbaciones externa en una sola perturbación total, se introdujo el control con rechazo activo de perturbaciones (ADRC), la cual, es una metodología relativamente nueva que permite la estimación y rechazo de las perturbaciones en tiempo real a través de un control de retroalimentación (Han (2009)). El ADRC emplea un observador de estado extendido (OEE) para la estimación de las perturbaciones externas e internas. Por lo tanto, no es necesario contar con un modelo dinámico preciso o del conocimiento de las posibles perturbaciones que afectaran al sistema (Sira-Ramírez et al. (2017)). El enfoque de control ADRC sea ha empleado en diferentes áreas y sistemas de control, por ejemplo: en (Orozco-Soto and Ibarra-Zannatha (2017)) para el movimiento de robots humanoides, en (Abdallah and Fareh (2019)) para el control de un manipulador en serie de 2 GDL y en (Guerrero-Castellanos et al. (2018)) para regular el ciclo de marcha en una ortesis de tobillo.

En este trabajo se propone un control bajo la técnica de control con rechazo activo de perturbaciones para el seguimiento de la posición de un brazo robótico humanoide. El diseño de la retroalimentación se realiza vía una función de control de Lyapunov (CLF) basándose en la fórmula universal de Sontag (Sontag (1998)), debido a que la existencia de un CLF es necesaria y suficiente para la estabilización de un sistema. En (Kolathaya and Ames (2014)) se muestra la convergencia exponencial de controladores basados en modelos usando un control CLF.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: En la sección 2 se presentan los preliminares matemáticos importantes en el desarrollo de este trabajo. La sección 3 describe de forma breve el modelo del sistema del brazo robótico. En la sección 4 se describe la propuesta de

control bajo la técnica ADRC usando el enfoque CFL para el control de retroalimentación. La sección 5 contiene la simulación numérica y el análisis de los resultados de la respuesta del control propuesto. Por último, se dan algunas conclusiones en la sección 6.

2. PRELIMINARES

2.1 Dinámica de robots articulados de N-GDL

La descripción de la dinámica de un robot articulado de N-grados de libertad (GDL) se puede representar mediante el modelo general de un sistema Euler-Lagrange totalmente actuado evolucionando en el espacio de configuraciones N-dimensional $\mathcal{Q} = \mathbb{R}^N$, esto es:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \tau \quad (1)$$

donde $q = [q_1 \ q_2 \dots q_n]^T \in \mathcal{Q}$ es el vector de coordenadas generalizadas, $\dot{q} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \dots \dot{q}_n]^T \in T_q \mathcal{Q}$ es el vector de velocidades generalizadas y $\tau = [\tau_1 \ \dots \ \tau_n]^T$ es el vector de torques de entrada, producidos por los actuadores (Spong et al. (2005)). Además, $\mathcal{L}(q, \dot{q}) : \mathbb{R}^{2N} \rightarrow \mathbb{R}$ es la función Lagrangiana resultado de la diferencia entre la energía cinética \mathcal{K} y su energía potencial \mathcal{U} , es decir:

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q}) - \mathcal{U}(q) \quad (2)$$

El desarrollo de estas expresiones, da como resultado una forma mas compacta, descrita por:

$$M(q)\ddot{q} + \mathcal{C}(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (3)$$

donde $M(q) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ es la matriz generalizada de inercia la cual se asume ser simétrica y definida positiva, ver (Bullo and Lewis (2005)). $\mathcal{C}(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ es la matriz de Coriolis y de fuerzas centrífugas y $G(q) := \partial \mathcal{U} / \partial q$ es el vector de fuerzas o pares gravitatorios.

El modelo dinámico (3) tiene las siguientes propiedades (Kelly et al. (2005)):

Propiedad 1. La matriz de inercia $M(q)$ es simétrica definida positiva y existe un número positivo real α tal que:

$$M(q) \geq \alpha I \quad \forall q \in \mathbb{R}^N$$

donde I denota la matriz de identidad de dimensión $n \times n$. La matriz $M(q)^{-1}$ existe y es definida positiva.

Propiedad 2. La matriz $\mathcal{C}(q, \dot{q})$ cumple

$$\|\mathcal{C}(q, x)y\| \leq k_{C_1} \|x\| \|y\|$$

para todo $q, x, y \in \mathbb{R}^N$, donde $k_{C_1} > 0$

Propiedad 3. Las matrices $M(q)$ y $\mathcal{C}(q, \dot{q})$ se relacionan por la siguiente expresión

$$x^T \left[\dot{M}(q) - 2\mathcal{C}(q, \dot{q}) \right] x = 0$$

que resulta antisimétrica y también cumple que:

$$\dot{M}(q) = \mathcal{C}(q, \dot{q}) + \mathcal{C}(q, \dot{q})^T.$$

2.2 Estabilización mediante Funciones de Lyapunov de Control (CLF)

Considere el sistema no lineal afín en la entrada:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (4)$$

donde $x \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$, $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^p$, y f y g son funciones de Lipschitz que se desvanecen en el origen. Si el sistema (4) admite una retroalimentación estática $k : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}$, entonces existe una Función de Lyapunov de Control (CLF) $V : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$, que es una función suave, definida positiva tal que:

$$\dot{V} = \underbrace{\frac{\partial V}{\partial x} f(x)}_{:=a(x)} + \underbrace{\frac{\partial V}{\partial x} g(x) \kappa(x)}_{:=b(x)} < 0 \quad (5)$$

donde κ es una constante de sintonización definida positiva. Un requisito equivalente al de (5) es el siguiente:

$$b(x) = 0 \Rightarrow a(x) < 0 \quad (6)$$

Teorema 2.1 (Fórmula universal de Sontag (Sontag, 1998)). *Suponiendo que el sistema (4) admite V como CLF. Para cualquier función analítica real $\bar{q} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $\bar{q}(0) = 0$ y $b\bar{q}(b) > 0$ para $b \neq 0$, sea $\gamma_C : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ definida por:*

$$\gamma_C(a, b) := \begin{cases} \frac{a(x) + \sqrt{a(x)^2 + b(x)\bar{q}(b(x))}}{b(x)} & \text{if } b \neq 0 \\ 0 & \text{if } b = 0 \end{cases} \quad (7)$$

tal que la función de control esté dada por $u : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}$, la cual es suave en $\mathcal{X} \setminus \{0\}$ y definida de la siguiente forma

$$u_i(x) := -b_i(x)\gamma_C(a(x), \beta(x)), \quad i \in \{1, \dots, p\} \quad (8)$$

con $\beta(x) := \|b(x)\|^2$. Entonces u es tal que para todo x diferente de cero se cumple que $\frac{\partial V}{\partial x} f(x) + \frac{\partial V}{\partial x} g(x)u(x) < 0$. Además, si la CLF satisface la propiedad del control pequeño (Sontag, 1998), tomando $\bar{q}(b(x)) := b(x)$, el control es continuo en el origen.

3. MODELO DEL SISTEMA

El sistema propuesto en este trabajo es un miembro superior o brazo, de un robot antropomórfico humanoide. El diseño del sistema esta integrado por cuatro grados de libertad con pares cinemáticos rotacionales, completamente actuados e impulsados, mayormente, por actuadores lineales. La distribución de los pares cinemáticos o articulaciones, permiten la aproximación angular de los movimientos humanos.

En la figura 1 se muestra un diagrama del brazo robótico izquierdo utilizado para modelar el sistema, donde se denota con $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ los cuatro eslabones que conectan con las articulaciones y los ángulos de rotación formados por el movimiento de cada articulación se describen por $\{q_1, q_2, q_3, q_4\}$.

El modelo dinámico del sistema brazo robótico esta dado por la ecuación compacta (3) descrita en la sección anterior. Este modelo depende de las ecuaciones

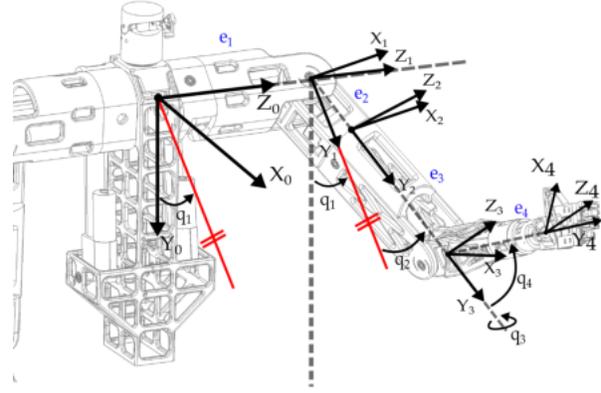


Figura 1. Diagrama del brazo robótico humanoide de 4 GDL con ejes de referencia.

de movimiento de Lagrange, las cuales involucran las energías cinética y potencial, (2). De modo tal, que lo primero es encontrar estas energías, para cada eslabón, que dependen de las características paramétricas del sistema; las cuales son: la longitud, la masa, el centro de masa y la inercia, estos parámetros se muestran en la Tabla 1. Posteriormente, es necesario conocer la relación cinemática del eslabón e_i con los anteriores hasta la base, por lo cual, se estableció un sistema de referencia en la base: (X_0, Y_0, Z_0) . Partiendo de este sistema de referencia, se obtuvieron las matrices de transformación homogénea de cada articulación con respecto a la anterior articulación, esta relación cinemática permite obtener el modelo dinámico. Para conocer la matriz de inercia $M(q)$ obtenida para el modelo del brazo robótico humanoide de 4 GDL, se sugiere al lector consultar el siguiente enlace: <https://drive.google.com/file/d/1aF5pDWjpeJFHjLnvqY6j9RX7thCnFGw/view?usp=sharing>.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR BASADO EN OBSERVADOR DE PERTURBACIONES Y CLF

En esta sección se aborda el diseño de la propuesta de control para el sistema brazo robótico descrito por la ecuación (3). Dadas las propiedades enunciadas en la sección anterior y asumiendo que el sistema está sujeto a perturbaciones externas representadas por el vector $\tau_d \in \mathbb{R}^4$, el sistema (3) se puede escribir como:

$$\ddot{q} = M(q)^{-1}\tau - \underbrace{M(q)^{-1}[C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_d]}_{\xi(t)} \quad (9)$$

En este trabajo, el vector de Coriolis, el vector de pares gravitatorios, así como el par de perturbación externa son considerados desconocidos y son concentrados en el vector $\xi(t) \in \mathbb{R}^4$, el cual se asume variante en el tiempo.

Definiendo las siguientes variables de estados $x_1 = q \in \mathbb{R}^4$ y $x_2 = \dot{q} \in \mathbb{R}^4$, el sistema (9) se reescribe de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)\tau - \xi(t) \end{cases} \quad (10)$$

A continuación, se diseña un observador que permita estimar el vector $\xi(t)$, al cual, de ahora en adelante, le llamaremos la "perturbación total".

4.1 Estimación del término $\xi(t)$

El diseño de un observador de estado extendido, usando el sistema (10), a través del cual se estimará el vector de perturbación $\xi(t)$ estará sujeto a las siguientes condiciones:

- Solo la posición en cada eslabón es medida, i.e. el vector x_1 se obtiene por medio de sensores;
- El valor nominal de la matriz generalizada de Inercia $M(x_1)$ es conocida;
- El vector de perturbación total $\xi(t)$ es uniformemente y absolutamente acotado i.e., $\sup_t \|\xi(\cdot)\| = \|\xi(x_1, x_2, \tau_d, t)\|_\infty \leq K_0$.
- La estimación del vector de perturbación total y su derivada temporal serán denotadas por η_1 y η_2 , respectivamente;
- La estimación del vector de posiciones y velocidades será denotadas \hat{x}_1 y \hat{x}_2 , respectivamente.

La propuesta del observador es la siguiente:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + l_3(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = M^{-1}(x_1)\tau + \eta_1 + l_2(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\eta}_1 = \eta_2 + l_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\eta}_2 = l_0(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (11)$$

donde τ que es la entrada de control y el grupo de constantes $\{l_0, l_1, l_2, l_3\}$ son ganancias del observador definidas positivas, las cuales se seleccionan con la ayuda de un polinomio Hurwitz de cuarto orden de la siguiente manera:

$$p(s) = (s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)^2 \\ l_0 = w_n^4, l_1 = 4\zeta w_n^3, l_2 = 4\zeta^2 w_n^2 + 2w_n^2, l_3 = 4\zeta w_n$$

4.2 Control de seguimiento de posición vía CLF

En este apartado se diseña un controlador que permita la estabilización y seguimiento de trayectorias de las posiciones articulares del sistema robótico en cuestión. Para ello se denotará como x_1^* , las posiciones de referencia. Basándose en (10) un control sugerido será el siguiente:

$$\tau = M(x_1)(\ddot{x}_1^* + v) \quad (12)$$

donde \ddot{x}_1^* es la segunda derivada de la posición deseada (término de precompensación) y v es el componente de retroalimentación que será diseñado posteriormente. Sea $z_1 = x_1 - x_1^*$ y $z_2 = \dot{x}_1 - \dot{x}_1^* = \dot{x}_1 - \dot{x}_1^*$ el error de seguimiento de posición y su derivada, respectivamente. Así, la dinámica del error de seguimiento en lazo cerrado se expresa como:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = v - \xi(t) \end{cases} \quad (13)$$

el cual tiene la forma $\dot{z} = Az + B(v - \xi)$ con $A \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$ y $B \in \mathbb{R}^{8 \times 4}$.

En este trabajo, el control que se propone está basado en una CLF, por lo que primero es necesario encontrar una función $V(z)$ para el sistema (13).

Proposición 4.1. La función $V : \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}$ definida por
$$V(z) = z^T P z \quad (14)$$

es una Función de Lyapunov de Control (CLF) para el sistema (13) relativo al equilibrio $z^e = (0 \ 0)^T$ con el control estabilizante:

$$v = -\epsilon B^T P z - \xi(t) \quad (15)$$

en la cual, $\epsilon \in \mathbb{R}^+$ es un término de sintonización, $P \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$ es la solución de la ecuación de Riccati (16) y donde $Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8)$:

$$A^T P + P A - 2\epsilon P B B^T P = -Q \quad (16)$$

Demostración. Para comprobar lo antes dicho, se evalúa $\dot{V}(z)$ a lo largo de las trayectorias en lazo cerrado de (4).

$$\begin{aligned} \dot{V}(z) &= \dot{z}^T P z + z^T P \dot{z} \\ &= z^T \underbrace{(A^T P + P A)}_{:=a(z)} z + \underbrace{2z^T P B}_{:=b(z)} (v - \xi(t)) \\ &= z^T \underbrace{(A^T P + P A - 2\epsilon P B B^T P)}_{-Q} z < 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Además, la derivada de $V(z)$ cumple con (6) \square

Observación 4.1. Note que el control en (15) únicamente es utilizado para la CLF, sin embargo, el control propuesto en este trabajo será definido en (18)

Con base en Teorema 2.1 de la fórmula universal de Sontag, el observador de perturbaciones (11) y la Proposición 4.1, la componente de retroalimentación v queda definida como:

$$v(z) = -b^T(z) (\gamma_C(a(z), b(z)) + \kappa) - \eta_1(t) \quad (18)$$

La expresión (18) representa nuestra principal aportación y el lector puede notar que se trata de un control no lineal, con rechazo activo de perturbaciones y que además posee propiedades interesantes de robustez. Debido al espacio limitado, la prueba es omitida, sin embargo, el sistema en lazo cerrado con la ley de control (18) tiene la propiedad ISS (Input-state-Stability) cuando el estado es el error de seguimiento z y la entrada es la diferencia entre la perturbación estimado y la perturbación real, i.e. $\xi(t) - \eta_1$.

5. SIMULACIONES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación del brazo humanoide izquierdo, aplicando el algoritmo de ADRC y la retroalimentación por medio de CLF, ver figura 2. Se comprobó el funcionamiento correcto en presencia tanto de perturbaciones internas como de externas, por lo cual, en $t = 5 \text{ seg}$ se aplicó un escalón de amplitud 2 Nm en la entrada del último eslabón para simular un torque de perturbación constante. Para el desarrollo de las simulaciones se usaron los parámetros mostrados en la tabla 1, que corresponden a los parámetros reales de diseño propuesto para el brazo robótico. Además, también se consideran los parámetros de diseño del OEE (11): $w_n = 55$ y $\zeta = 0,8$, que dan como resultado: $l_0 = 9150625$, $l_1 = 532400$, $l_2 = 13794$ y $l_3 = 176$.

Las trayectorias de posición deseadas y el seguimiento de las posiciones angulares de cada eslabón se presentan en la Figura 3, donde se aprecia un adecuado desempeño del controlador. El tiempo de transitorio, partiendo de condiciones iniciales $q = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, es de alrededor de 0.6 s. que es lo que tarda en alcanzar la referencia de seguimiento. En la Figura 4 se muestra el error de posición en cada eslabón que converge a 0, el error se encuentra alrededor de $\pm 0,02 \text{ rad}$. La Figura 5 muestra la respuesta del error de las perturbaciones dado por: $\xi - \eta$, donde ξ , descrita en (9), hace referencia a las perturbaciones endógenas y exógenas que afectan al sistema y η contiene las perturbaciones estimadas mediante el OEE. En la gráfica del error de la perturbación se observa que al ingresar una perturbación exógena en el eslabón final de la cadena cinemática que compone al sistema, se provocan perturbaciones en los demás eslabones, sin embargo, el error de la perturbación muestra que compensa rápidamente y vuelve a converger a 0.

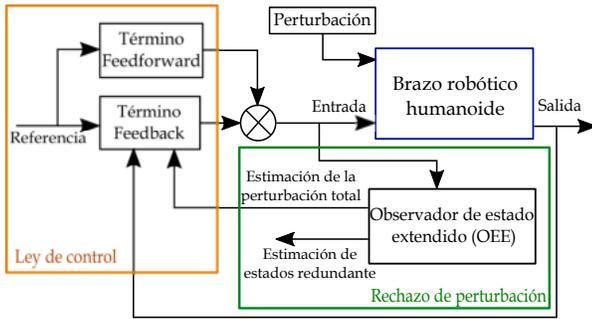


Figura 2. Diagrama general ADRC – OEE y ley de control basada en CLF.

Observación 5.1. Note que aunque la perturbación es variante en el tiempo, el término de seguimiento "feedforward" se mantiene invariante en el tiempo; lo que mantiene al sistema invariante en el tiempo, ver Figura 2.

Tabla 1. Parámetros de los brazos de 4 GDL del robot humanoide

Término	Medida	Descripción
d_1	0.248 m	Longitud del eslabón 1
d_2	0.113 m	Longitud del eslabón 2
d_3	0.249 m	Longitud del eslabón 3
d_4	0.184 m	Longitud del eslabón 4
d_{c1}	0.100 m	Long. centro de masa del eslabón 1
d_{c2}	0.070 m	Long. centro de masa del eslabón 2
d_{c3}	0.100 m	Long. centro de masa del eslabón 3
d_{c4}	0.150 m	Long. centro de masa del eslabón 4
m_1	1.700 Kg	Masa del eslabón 1 (con actuadores)
m_2	0.700 Kg	Masa del eslabón 2 (con actuadores)
m_3	1.530 Kg	Masa del eslabón 3 (con actuadores)
m_4	0.515 Kg	Masa del eslabón 4 (con actuadores)
I_1	1.200 Kgm ²	Inercia del eslabón 1
I_2	0.400 Kgm ²	Inercia del eslabón 2
I_3	1.100 Kgm ²	Inercia del eslabón 3
I_4	0.800 Kgm ²	Inercia del eslabón 4

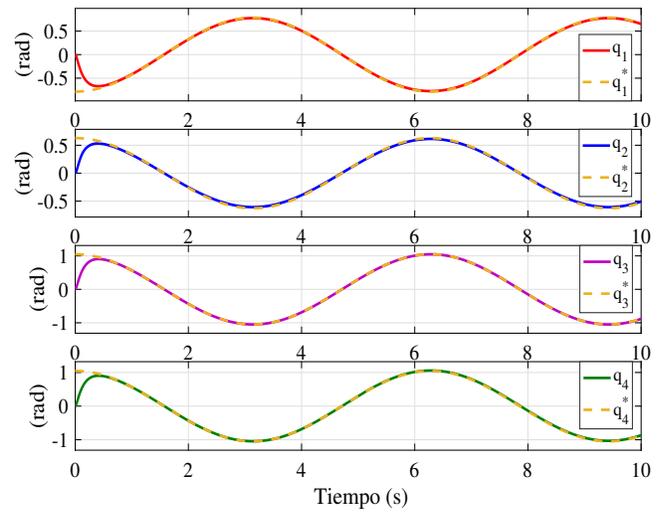


Figura 3. Respuesta de las posiciones angulares de los cuatro eslabones.

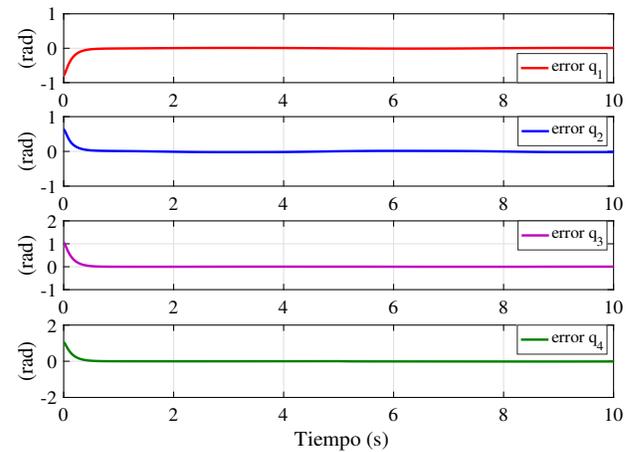


Figura 4. Respuesta del error de las posiciones angulares de los cuatro eslabones.

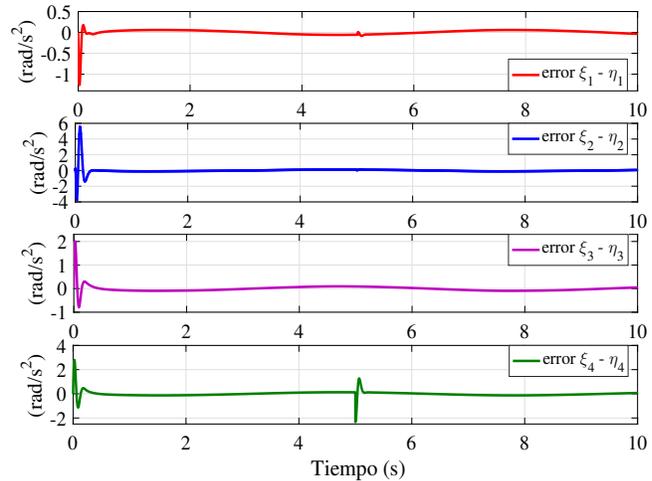


Figura 5. Respuesta de error de las perturbaciones en los cuatro eslabones.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la propuesta de un control no lineal de un brazo robótico humanoide, que resuelve el problema de seguimiento de trayectorias de la posición articular. La propuesta de control se basa en la técnica de control por rechazo activo de perturbaciones para lo cual se desarrollo un observador de estado extendido (OEE) y un control de retroalimentación basado en el concepto de funciones de Lyapunov de control (CLF). Los resultados en simulación muestran que la idea de agrupar a los términos desconocidos del modelo del sistema dentro del término de perturbación total junto con la perturbación externa, resulta interesante porque pone en evidencia la poca dependencia del control hacia el modelo matemático y garantiza la interacción con su entorno cualquiera que este sea. En el futuro se desarrollará una demostración formal de la estabilidad del sistema en lazo cerrado, considerando observador y control de retroalimentación. De la misma forma se trabaja para la implementación del sistema en un prototipo de robot antropomórfico de 8 GDL.

REFERENCIAS

- ABB (en línea). Yumi creando juntos un futuro automatizado. you and me (hoja de datos). Disponible: <http://new.abb.com/products/robotics/yumi>.
- Abdallah, M.A.Y. and Fareh, R. (2019). Tracking control of serial robot manipulator using active disturbance rejection control. In *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 1–5. doi:10.1109/ICASET.2019.8714470.
- Asfour, T., Schill, J., Peters, H., Klas, C., Bücker, J., Sander, C., Schulz, S., Kargov, A., Werner, T., and Bartenbach, V. (2013). Armair-4: A 63 dof torque controlled humanoid robot. In *2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 390–396. doi:10.1109/HUMANOIDS.2013.7030004.
- Bae, Y. and Jung, S. (2012). Cartesian trajectory control of humanoid robot arms based on a disturbance observer. In *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, 947–951.
- Bullo, F. and Lewis, A.D. (2005). *Geometric Control of Mechanical Systems: Modeling, Analysis, and Design for Simple Mechanical Control Systems*. Springer-Verlag, New York, first edition.
- Diftler, M.A., Mehling, J.S., Abdallah, M.E., Radford, N.A., Bridgwater, L.B., Sanders, A.M., Askew, R.S., Linn, D.M., Yamokoski, J.D., Permenter, F.A., Hargrave, B.K., Platt, R., Savely, R.T., and Ambrose, R.O. (2011). Robonaut 2 - the first humanoid robot in space. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2178–2183. doi:10.1109/ICRA.2011.5979830.
- Guerrero-Castellanos, J., Rifai, H., Arnez-Paniagua, V., Linares-Flores, J., Saynes-Torres, L., and Mohammed, S. (2018). Robust active disturbance rejection control via control lyapunov functions: Application to actuated-ankle-foot-orthosis. *Control Engineering Practice*, 80, 49 – 60. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.08.008>.
- Han, J. (2009). From pid to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(3), 900–906. doi:10.1109/TIE.2008.2011621.
- Huo, X., Liu, Y., Jiang, L., and Liu, H. (2012). Design and development of a 7-dof humanoid arm. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 277–282. doi:10.1109/ROBIO.2012.6490979.
- IFR (en línea). International federation of robotics. Disponible: <https://ifr.org/free-downloads/>.
- Kelly, R., Santibáñez, V., and Loría, A. (2005). *Control of robot manipulators in joint space*. Springer-Verlag London. doi:10.1007/b135572.
- Kolathaya, S. and Ames, A.D. (2014). Exponential convergence of a unified clf controller for robotic systems under parameter uncertainty. In *2014 American Control Conference*, 3710–3715. doi:10.1109/ACC.2014.6859407.
- Orozco-Soto, S.M. and Ibarra-Zannatha, J.M. (2017). Motion control of humanoid robots using sliding mode observer-based active disturbance rejection control. In *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 1–8. doi:10.1109/CCAC.2017.8276383.
- Ott, C., Eiberger, O., Friedl, W., Bauml, B., Hillenbrand, U., Borst, C., Albu-Schaffer, A., Brunner, B., Hirschmuller, H., Kielhofer, S., Konietzschke, R., Suppa, M., Wimbock, T., Zacharias, F., and Hirzinger, G. (2006). A humanoid two-arm system for dexterous manipulation. In *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 276–283. doi:10.1109/ICHR.2006.321397.
- Rader, S., Kaul, L., Fischbach, H., Vahrenkamp, N., and Asfour, T. (2016). Design of a high-performance humanoid dual arm system with inner shoulder joints. In *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 523–529. doi:10.1109/HUMANOIDS.2016.7803325.
- Rethink Robotics (en línea). Hoja de datos de baxter. Disponible: <http://www.rethinkrobotics.com/baxter>.
- Sira-Ramírez, H., Luviano-Juárez, A., Ramírez-Neria, M., and Zurita-Bustamante, E.W. (2017). *Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems: A Flatness-Based Approach*. Butterworth-Heinemann.
- Sontag, E.D. (1998). *Mathematical control theory, deterministic finite dimensional systems*. Springer Verlag, New York Berlin Heidelberg, second edition.
- Spong, M., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc.
- Villalobos-Chin, J. and Santibáñez, V. (2018). A fourier series based tracking controller for robot manipulators. *Congreso Nacional de Control Automático*.