

Control Difuso para Sistemas de Interacción Hombre-Robot

Fuzzy control for systems of human-robot interaction

Miguel A. Hoyos León, Raúl Villafuerte Segura, Omar A. Domínguez Ramírez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y Sistemas

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184

Email: villafuerte@uaeh.edu.mx, omar@uaeh.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de una ley de control difusa adaptable para mejorar el desempeño de los sistemas de interacción hombre-robot. Con el propósito de aproximar la dinámica desconocida del sistema robótico, se emplea el enfoque de sistemas difuso de tipo Mamdani. Además, una ley de adaptación es agregada al controlador para compensar incertidumbres debidas a la interacción hombre-robot. Los resultados teóricos obtenidos son ilustrados sobre un dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0.

Palabras Claves: Control difuso, Interfaces hápticas, Interacción Hombre-Robot.

Abstract

In this paper the design of a fuzzy adaptive control law to improve the performance of human-robot interaction systems is presented. In order to approximate the unknown dynamics of the robotic system, the fuzzy systems approach of Mamdani type is used. In addition, the adaptive law to the controller for compensate the uncertainties of the system caused by the human-robot interaction is added. The theoretical results obtained are illustrated on the PHANToM Premium 1.0 haptic device.

Keywords: Fuzzy control, Haptic device, Human-Robot interaction.

Introducción

Los sistemas de interacción hombre-robot nacen de la necesidad de resolver problemas, algunos de ellos son: teleoperación de sistemas robóticos para evitar el riesgo humano, crear plataformas para evaluación biomecánica, sistemas de entrenamiento, entre otros.

En la última década se ha prestado especial atención al diseño de controles para sistemas robóticos que permitan al ser humano interactuar activamente con un ambiente de visualización virtual, incorporando estímulos táctiles. A este tipo de sistemas se les conoce como interfaces hápticas, las cuales están constituidas por un operador humano, un ambiente de visualización virtual y un sistema electromecánico denominado dispositivo háptico. En los últimos años se ha demostrado que las interfaces háptico han tenido resultados importantes en tareas como la neurorehabilitación, debido a que las terapias están basadas en tareas orientadas a movimientos repetitivos y precisos (guiado o seguimiento de trayectorias). El empleo de interfaces hápticas reduce el tiempo de recuperación de un paciente en extremidades inferiores, extremidades superiores, en tronco, cuello y cabeza.

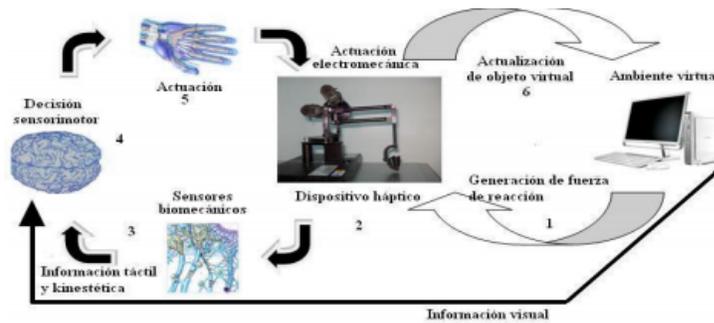


Figura 1: Diagrama de interfaz háptica.

El PHANToM Premium 1.0 es un dispositivo háptico que proporciona una amplia gama de fuerza de trabajo, amplitud de movimiento, rigidez, fuerza y motores para dar cabida a las necesidades específicas de los diferentes proyectos de investigación. Este dispositivo cuenta con realimentación de fuerzas las cuales incorporan estímulos táctiles y así permitir a un usuario “sentir” objetos virtuales en un entorno de simulación [2].

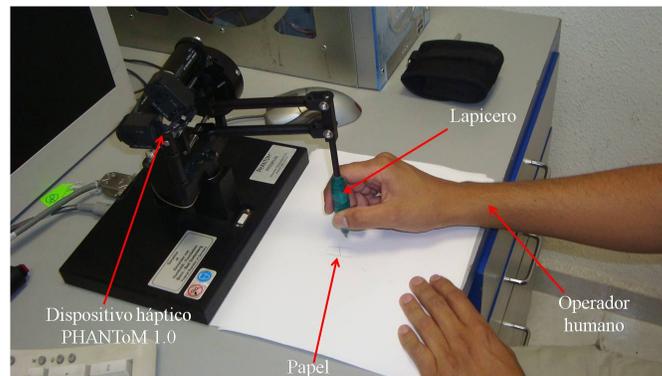


Figura 2: Dispositivo háptico PHANToM Premium 1.0.

Motivación

Las estrategias de evaluación de interfaces hombre-robot existentes, valoran el desempeño de un robot en interacción con un operador humano. Si las condiciones de manipulación de la interfaz en

tareas tales como el guiado o seguimiento de trayectorias no favorecen al usuario, éste termina abandonando la tarea o ejecutándola inadecuadamente. Además, existen variables en tareas de exploración (humano activo) o de guiado háptico (humano pasivo) **difíciles de modelar**. De ahí la preocupación por el diseño y la validación de nuevas estrategias de control que mejoren el desempeño de un sistema de interacción hombre-robot en tareas de seguimiento de trayectorias cuando las dinámicas y/o el modelo matemático son desconocidos.

Planteamiento del Problema

Considere un sistema no lineal con múltiple-entrada y múltiple-salida de la forma

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F(x) + G(x)u, \\ y &= H(x, u), \end{aligned} \quad (\text{SNL})$$

donde $x := x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t))^T \in \mathbb{R}^p$ es el vector de estados, $y := y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_k(t))^T \in \mathbb{R}^k$ es el vector de salidas, $u := u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t))$ es el vector de fuerzas de entrada o señal de control; finalmente $H(x, u) = [h_l(x, u)]_{l=1, \dots, k}^T \in \mathbb{R}^k$, $F(x) = [f_i(x)]_{i=1, \dots, p}^T \in \mathbb{R}^p$ y $G(x) = [g_{i,j}(x)]_{i,j=1, \dots, p} \in \mathbb{R}^{p \times p}$ son funciones no lineales suaves **desconocidas**.

Por otro lado, definiendo el error de seguimiento como

$$e_i := e_i(t) = y_{d_i}(t) - y_i(t), \quad i = 1, \dots, p, \quad (1)$$

donde $y_{d_i} := y_{d_i}(t)$ es una señal de referencia deseada para cada variable de salida $y_i := y_i(t)$. También, se define el error de seguimiento filtrado siguiente

$$\begin{aligned} s_i := s_i(t) &= \sum_{m=0}^{r_i-1} \frac{(r_i-1)!}{m!(r_i-1-m)} \lambda_i^m e_i^{(r_i-1-m)} + \alpha_i \int_0^t e_i(\theta) d\theta \\ &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i \right)^{(r_i-1)} e_i(t) + \alpha_i \int_0^t e_i(\theta) d\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

con $\lambda_i, \alpha_i > 0$ para $i = 1, \dots, p$. Ahora, observe que al derivar respecto al tiempo la ecuación (2) se tiene que

$$\dot{s}_i = v_i - f_i(x) - \sum_{j=1}^p g_{ij}(x)u_j, \quad i = 1, \dots, p, \quad (3)$$

donde

$$v_i = y_{d_i}^{(r_i)} + \beta_{i,r_i-1} e_i^{(r_i-1)} + \dots + \beta_{i,1} \dot{e}_i + \alpha_i e_i,$$

con

$$\beta_{i,j} = \frac{(r_i-1)!}{(r_i-j)!(j-1)!} \lambda_i^{r_i-j}, \quad i = 1, \dots, p, \quad j = 1, \dots, r_i - 1.$$

Así, definiendo $s(t) = [s_1(t) \dots s_p(t)]^T$ y $v(t) = [v_1(t) \dots v_p(t)]^T$, la ecuación (3) puede escribirse como

$$\dot{s} = v - F(x) - G(x)u. \quad (4)$$

Note que, $e_i(t) \rightarrow 0$ cuando $s_i(t) \rightarrow 0$. Por lo que, el desempeño del sistema (SNL) en tareas de seguimiento de trayectorias deseadas $y_{d_i}(t)$, queda completamente determinado por la convergencia asintótica del sistema (4). En otras palabras, el problema se reduce a diseñar una ley de control $u(t)$ talque estabilice asintóticamente al sistema (4).

Objetivo General

Diseñar y aplicar una ley de control capaz de manipular un sistema robótico complejo de la forma (SNL) y apto para compensar las dinámicas (incertidumbre) generadas por la interacción hombre-robot.

Objetivos particulares

- Aproximar las funciones $F(x)$, $G(x)$, empleando Sistemas Difusos de tipo Mamdani.
- Diseñar un 1^{er} esquema de control $u(t)$ para estabilizar asintóticamente al sistema (4), empleando las aproximaciones $\hat{F}(x)$, $\hat{G}(x)$ obtenidas mediante técnicas difusa.
- Diseñar un 2^{do} esquema de control $u(t)$ para compensar incertidumbre debidas a interacción Hombre-Robot, empleando técnicas de control adaptable.
- Analizar la dinámica de dispositivos hápticos y su interacción hombre-robot.
- Implementar los resultados teóricos en el PHANToM Premium 1.0.

Diseño del controlador

- Aplicando técnicas difusas se propone un 1^{er} esquema de control para sistema de la forma (SNL):

$$u(t) := u_1(t) = \hat{G}^{-1}(x) (-\hat{F}(x) + v + K_0 s), \quad (5)$$

con $K_0 \in \mathbb{R}^{p \times p}$ es una matriz definida positiva, es decir, todos sus valores propios son positivos, $s(t) = [s_1(t) \dots s_p(t)]^T$. Además, $\hat{F}(x)$ y $\hat{G}(x)$ son aproximaciones de la funciones $F(x)$ y $G(x)$ del sistema no lineal (SNL), respectivamente. Estas aproximaciones están compuestas por las funciones no lineales $\hat{f}_i(x)$ y $\hat{g}_{ij}(x)$ sobre un conjunto compacto D_x , obtenidas mediante técnicas de estimación difusa del tipo Mamdani [5]. También, se asume que dichas funciones son de la forma:

$$\begin{aligned} \hat{f}_i(x, \theta_{f_i}) &= w_{f_i}^T(x) \theta_{f_i}, \quad i = 1, \dots, p, \\ \hat{g}_{ij}(x, \theta_{g_{ij}}) &= w_{g_{ij}}^T(x) \theta_{g_{ij}}, \quad i, j = 1, \dots, p, \end{aligned}$$

donde $w_{f_i}(x)$ y $w_{g_{ij}}(x)$ son vectores de funciones base establecidas por el diseñador, θ_{f_i} y $\theta_{g_{ij}}$ son los correspondientes vectores de parámetros ajustables de cada sistema difuso.

- Aplicando técnicas adaptables el 2^{do} esquema de control es como sigue:

$$u(t) := u_2(t) = u_c(t) + u_r(t), \quad (6)$$

con

$$u_r = s \left(\frac{\psi}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta} \right),$$

$$u_c = \hat{G}^T(x, \theta_g) \left[\varepsilon_0 I_P + \hat{G}(x, \theta_g) \hat{G}^T(x, \theta_g) \right]^{-1} \left(K_0 s + v - \hat{F}(x, \theta_f) \right)$$

con la ley adaptativa siguiente

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_f &= -N_f^{-1} w_f s \\ \dot{\theta}_{g_i} &= -N_{g_i}^{-1} w_{g_i} s u_i \\ \dot{\delta} &= -\eta_0 \frac{\psi}{\sigma_0 \|s\|^2 + \delta}. \end{aligned}$$

Aquí, $\delta \in \mathbb{R}$, $\theta_f = [\theta_{f_1}, \dots, \theta_{f_p}]^T$ y $\theta_{g_i} = [\theta_{g_{1i}}, \dots, \theta_{g_{pi}}]^T$,

$$N_f = \text{diag} [1/\eta_{f_1}, 1/\eta_{f_2}, \dots, 1/\eta_{f_p}],$$

$$N_{g_i} = \text{diag} [1/\eta_{g_{1i}}, 1/\eta_{g_{2i}}, \dots, 1/\eta_{g_{pi}}],$$

$$w_f = \text{diag} [w_{f_1}^T, w_{f_2}^T, \dots, w_{f_p}^T],$$

$$w_{g_i} = \text{diag} [w_{g_{1i}}^T, w_{g_{2i}}^T, \dots, w_{g_{pi}}^T],$$

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{1}{2} \left[s^T (Q_0 + Q_1 + Q_2) s + \bar{\varepsilon}_f^T(x) Q_0^{-1} \bar{\varepsilon}_f \right. \\ &\quad \left. + (\bar{\varepsilon}_g(x) u_c)^T Q_1^{-1} (\bar{\varepsilon}_g(x) u_c) + u_0^T Q_2^{-1} u_0 \right], \end{aligned}$$

finalmente η_{f_i} y $\eta_{g_{ij}}$ son constantes positivas.

Implementación del controlador

Los esquemas de control anteriores son implementados en el dispositivo háptico PHANTOM Premium 1.0, ver Fig. 2. Se emplearon herramientas de simulación (Matlab-Simulink) y de programación en C++ para su implementación en tiempo “Real”.

La razón de considerar un sistema de lazo cerrado con el operador humano en el lazo de control adaptable, es la existencia de incertidumbre dinámica que el usuario representa, y los efectos sobre la dinámica inercial, de Coriolis, gravitacional y de fricción articular modeladas y validadas en trabajos publicados previamente. El esquema siguiente, representa la organización de la validación de la plataforma basada en un control difuso de tipo adaptable para un sistema robótico sujeto a incertidumbre dinámica.

$$\text{Evaluación de la plataforma} \begin{cases} \text{Movimiento libre} \\ \text{Movimiento con incertidumbres} \end{cases}$$

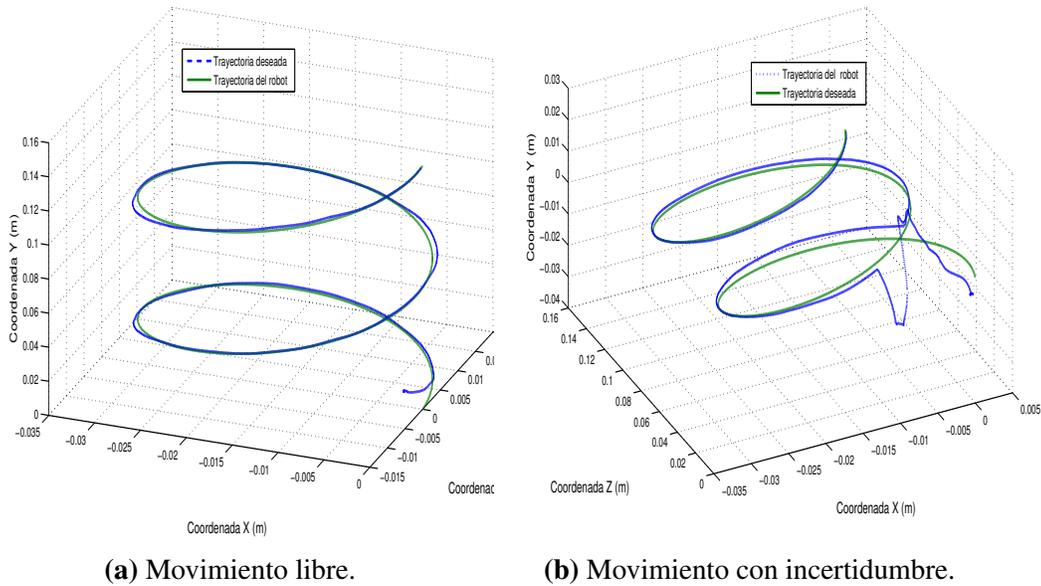


Figura 3: Movimiento del dispositivo háptico en diferentes tareas de seguimiento.

Movimiento libre: El dispositivo háptico no es sujeto a incertidumbre, el control calcula su señal con base en la dinámica y logra la convergencia de posición y velocidad, así como una estimación del vector de parámetros dinámicos.

En la Fig. 3a se muestra el resultado de este experimento. Aquí se emplean los modelos cinemáticos de posición y diferencial con el propósito de evaluar a la estrategia de control articular, y verificar su desempeño en el espacio operacional. Dado que es un dispositivo háptico y su propósito es exploración y navegación en ambientes virtuales dinámicos, al no contar con la presencia del operador humano, la tarea de guiado háptico es únicamente para confirmar el desempeño de la tarea. La tarea, intencionadamente rastrea un espacio de trabajo amplio, de modo que el control permita validar su desempeño ante el cambio de la dinámica no lineal para distintas configuraciones admisibles.

Movimiento con incertidumbres: En esta etapa de experimentación, se evalúa el desempeño de la ley de control propuesta con el operador humano en el lazo. Intencionadamente, dicho operador perturba en un instante de tiempo a la trayectoria (situación aceptable por las propiedades electromecánicas que el dispositivo háptico posee). Los beneficios de una ley de control adaptable de alto desempeño, se aprecian ante la presencia de incertidumbre dinámica, y particularmente en los parámetros estimados cuya magnitud evidentemente se incrementa en función de la carga asociada al efector final.

En la Fig. 3b se presenta los resultados cuando el operador humano aplica una sola perturbación al dispositivo durante la ejecución de la tarea de seguimiento.

Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño de una ley de control difusa adaptable para mejorar el desempeño de los sistemas de interacción hombre-robot. Dado que la dinámica del sistema robótico se asume desconocida, se emplean sistemas difusos de tipo Mamdani para su aproximación. Además, con el fin de compensar las variaciones y/o incertidumbres paramétricas debidas de la interacción hombre-robot una ley de adaptación es agregada al controlador. Finalmente, los resultados teóricos obtenidos fueron ilustrados sobre un dispositivo háptico PHANTOM Premium 1.0.

El diseño y la aplicación de una ley de control difusa adaptable (5) y (6) resulta una excelente alternativa para manipular sistemas de interacción hombre-robot, donde la dinámica se asume desconocida.

Referencias

- [1] S. Labiod, M.S. Boucherit, and T.M. Guerra. Adaptive fuzzy control of a class of mimo nonlinear systems. *Fuzzy Sets Systems*, 151:59–77, 2005.
- [2] T. Massie and K. Salisbury. The phantom haptic interface a dvice for probing virtual objects. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, pages 295–301, 1994.
- [3] K. Salisbury and Barbagli F. Conti, F. Haptic rendering:introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24:2:24–32, 2004.
- [4] T. Takagi and Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Trans. Syst. Man. Cyber*, 15:116–132, 1985.
- [5] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.