

Control Servovisual difuso: Aplicación a Robots Manipuladores en 3D

Maximiliano Bueno-López*. Marco A. Arteaga-Pérez**.
Carlos A. Torres-Pinzón***

*Universidad de La Salle, Programa de Ingeniería Eléctrica, Bogotá D.C. Colombia
(Tel: +571-3535360 Ext.:2528; e-mail: maxbueno@unisalle.edu.co).

**Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México
Departamento de Control y Robótica. División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería
(e-mail: marteagp@unam.mx)

*** Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Electrónica, Bogotá D.C. Colombia,
(e-mail: carlostorresp@usantotomas.edu.co)

Resumen: La lógica difusa se ha convertido en una alternativa interesante para el control de diferentes sistemas que resultan difíciles de modelar analíticamente. En el área de robots manipuladores se han presentado varias publicaciones que utilizan esta estrategia, pero muy pocas emplean cámaras como sensores. En este artículo se propone una metodología de control difuso que está basada en un modelo del tipo Takagi-Sugeno para abordar el problema de seguimiento de trayectorias del efector final de un robot manipulador. Para conocer su velocidad se propone un observador difuso y la prueba de estabilidad utiliza una estrategia basada en el empleo de funciones cuadráticas de Lyapunov. El diseño se hace directamente en coordenadas de imagen. Se presentan resultados experimentales para mostrar el buen funcionamiento de la estrategia propuesta.

Keywords: Control Servovisual, Lógica Difusa, Robots Manipuladores, Visión 3D.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las leyes de control de trayectoria para robots manipuladores, las mediciones necesarias son obtenidas a partir de encoders ubicados en las articulaciones (Tayebia y Islam (2006), S. Hutchinson (2007)). Cuando el manipulador opera en un ambiente no estructurado, una alternativa es emplear sistemas de visión para obtener la posición del efector final requerida por el controlador, como lo mencionan Chaumette y Hutchinson (2006). Al control que hace uso de la información visual para cerrar el lazo de realimentación suele denominarse visual servoing o control servovisual. El uso de cámaras en el control de robots manipuladores se ha incrementado en los últimos años debido a su buen comportamiento; ejemplo de esto son las publicaciones de Lizarralde et al. (2008) y Weng et al. (2010), los cuales proponen un controlador adaptable para robots manipuladores planares empleando servovisión, el algoritmo es desarrollado para sistemas visuales basados en imagen y permite el seguimiento de una trayectoria deseada cuando la calibración de la cámara y la dinámica del robot son inciertas. Weng et al. (2010) presentan un controlador adaptable para seguimiento de trayectoria basado en la imagen sin medición de velocidad; los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara no son calibrados. Otra aplicación del control servovisual es presentada por Liu et al. (2006), quienes proponen también un control adaptable, siendo esta en una de las técnicas más utilizadas en el área del control visual de robots manipuladores. Recientemente, varios autores han propuesto controlar la trayectoria del efector final de un manipulador empleando controladores y observadores difusos, como lo mencionan Choi (2007) y

Alavandar y Nigan (2008). Según la revisión bibliográfica hecha para la elaboración de este artículo, la combinación de observadores y controladores difusos en aplicaciones que utilizan cámaras como sensores no ha sido publicada. La principal contribución de este artículo es establecer una estrategia de control servovisual difuso para el control de trayectoria de robots manipuladores en 3D en ausencia de parámetros de la cámara, dinámica del robot y mediciones de velocidad, sea de coordenadas de imagen o articulares. La información del espacio tridimensional es obtenida a partir de dos cámaras que observan el robot. La ley de control es calculada por mediciones de características de un objeto de forma esférica colocado en el extremo del efector final. El artículo está organizado como sigue: la Sección 2 presenta el estado del arte de la lógica difusa aplicada al control de robots manipuladores. Los conceptos básicos de compensación distribuida paralela y estabilidad cuadrática se presentan en la Sección 3. El diseño del controlador se da en la Sección 4, y los resultados experimentales son presentados en la Sección 5. Finalmente, algunas conclusiones se proporcionan en la Sección 6.

2. CONTROLADORES Y OBSERVADORES DIFUSOS APLICADOS A ROBOTS MANIPULADORES

Durante las últimas dos décadas, el control empleando lógica difusa ha atraído gran atención tanto en las comunidades académicas como industriales. Muchas personas han destinado una gran cantidad de tiempo y esfuerzo a la investigación teórica y la aplicación de técnicas de controladores difusos, siendo uno de los métodos más útiles para el uso del conocimiento cualitativo en el diseño de controladores. Entre los métodos de control basados en

modelos difusos, el propuesto por Takagi Sugeno (T-S) (Takagi y Sugeno (1985)) es una de las estrategias más eficaces. Básicamente, esta aproximación supone que un modelo dinámico complejo puede estar compuesto por un conjunto de modelos lineales. No es sorpresa hoy en día encontrar aplicaciones prácticas de lógica difusa en diferentes campos, como se menciona en Hwang y Kim (2006). En el diseño de controladores difusos una buena opción es usar la técnica conocida como Compensación Distribuida Paralela (PDC). La historia del PDC inicia con un diseño basado en el modelo T-S, sin embargo, la estabilidad del sistema no fue discutida hasta 1992 por Tanaka y Sugeno (1992). Fares et al. (2007) proponen un sistema de lógica difusa y algoritmos genéticos integrados para adaptación visual, los algoritmos genéticos se utilizan para optimizar las funciones de pertenencia. Solo algunas de las referencias mencionadas se combinan con visión. Tanaka et al. (2001), y Bernal y Guerra (2010) han establecido conceptos básicos para probar estabilidad de sistemas difusos usando desigualdades de matrices lineales (LMI).

En el diseño de sistemas de control, la mayoría de las veces se asume que todas las variables están disponibles. Asumir esto no siempre es cierto porque no todas las variables de estado son posibles de medir. Diferentes métodos se han propuesto para estimar e identificar los estados del sistema cuando solo se tienen datos de entrada y salida (Tanaka et al. (1998)). La lógica difusa se ha empezado a utilizar para el diseño de observadores no hace mucho tiempo, y es una estrategia que está actualmente bajo investigación como lo mencionan Tanaka y Wang (2001).

3. COMPENSACIÓN DISTRIBUIDA PARALELA PARA MODELOS TAKAGI-SUGENO

La compensación distribuida paralela, que proporciona un procedimiento para diseñar controladores difusos a partir del modelo T-S, fue propuesta por Wang et al. (1995). La idea consiste en compensar cada uno de los subsistemas propuestos por las reglas difusas utilizando técnicas de control lineal, y luego inferir una acción de control global a partir de las reglas que tengan las mismas premisas que las del modelo y que propongan cada una la compensación correspondiente. La construcción del modelo está basada en reglas de la forma mostrada en la expresión (1) (Tanaka y Wang (2001))

$$\begin{aligned} \text{Regla } i: \text{ Si } z_1(t) \text{ es } M_{i1} \text{ y } \dots \text{ y } z_g(t) \text{ es } M_{ig} \\ \text{Entonces } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t), i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (1)$$

donde M_{ij} ($j = 1, 2, \dots, g$) son conjuntos difusos, r es el número de reglas del modelo, $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ es el vector de entrada, $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^q$ es el vector de salida, $\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}_i \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $\mathbf{C}_i \in \mathbf{R}^{q \times n}$, $\mathbf{z}(t) = [z_1(t), \dots, z_g(t)]$ son las variables que componen las premisas.

El estado final del sistema se calcula como

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t), \quad (3)$$

donde

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^g M_{ij}(z_j(t)) \quad (4)$$

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (5)$$

$M_{ij}(z(t))$ es el grado de pertenencia de $z_j(t)$ en M_{ij} . En este artículo se asume que

$$w_i(z(t)) \geq 0, i = 1, 2, \dots, r \text{ y } \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0, \quad (6)$$

para todo t . Por lo tanto

$$h_i(z(t)) \geq 0, i = 1, 2, \dots, r \text{ y } \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1, \quad (7)$$

Por conveniencia de notación $h_i(z(t)) = h_i$ y $w_i(z(t)) = w_i$. La dinámica del estado final del sistema difuso se representa como

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \sum_{i=1}^r h_i \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t), \quad (8)$$

Propiedad 3.1. Si los pares $(\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i)$, $i=1,2,\dots,r$ son controlables, el sistema difuso (1) es llamado localmente controlable.

Para el modelo (1) se ha construido el siguiente controlador PDC

$$\begin{aligned} \text{Regla } i: \text{ Si } z_1(t) \text{ es } M_{i1} \text{ y } \dots \text{ y } z_g \text{ es } M_{ig} \\ \text{Entonces } \mathbf{u}(t) = -\mathbf{F}_i \mathbf{x}(t), i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (9)$$

El objetivo principal es determinar los valores de \mathbf{F}_i en los consecuentes de las reglas. Con la aproximación PDC se tiene un procedimiento simple para afrontar el problema de control de sistemas no lineales. La salida final está dada por

$$\mathbf{u}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \mathbf{F}_i \mathbf{x}(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \mathbf{F}_i \mathbf{x}(t), \quad (10)$$

3.1. Condiciones de estabilidad cuadrática

Definición 1. Se dice que el sistema $\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$ es cuadráticamente estable si existe una función cuadrática

$$V(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t), V(0) = 0, \quad (11)$$

que satisface las siguientes condiciones

$$V(\mathbf{x}(t)) > 0, \forall \mathbf{x}(t) \neq 0 \leftrightarrow \mathbf{P} > 0, \quad (12)$$

$$\dot{V}(x(t)) > 0, \forall x(t) \neq 0, \quad (13)$$

Si V existe, se le conoce como función de Lyapunov.

Al sustituir (10) en (2), se obtiene el sistema Takagi–Sugeno en lazo cerrado como lo presenta Abdelmalek et al. (2007)

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))(A_i - B_i F_j)x(t), \quad (14)$$

la cual se puede reescribir como

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^r h_i(z(t))h_i(z(t))G_{ii}x(t), \quad (15) \\ & + 2 \sum_{i=1}^r \sum_{j < i} h_i(z(t))h_j(z(t)) \left(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2} \right) x(t), \end{aligned}$$

donde $G_{ij} = A_i - B_i F_j$ y $G_{ii} = A_i - B_i F_i$.

Las condiciones de estabilidad correspondientes a funciones cuadráticas de Lyapunov fueron presentadas inicialmente por Tanaka y Sugeno (1992). Esta aproximación requiere encontrar una matriz común definida positiva para r subsistemas, lo que hace a este método altamente conservativo, Abdelmalek et al. (2007) definieron condiciones de estabilidad no cuadráticas que eliminan esta restricción.

3.2. Criterios de estabilidad

La estrategia utilizada para probar estabilidad del sistema fue propuesta por Abdelmalek et al. (2007) y toma en cuenta las siguientes consideraciones

Consideración 3.1. La derivada con respecto al tiempo de las funciones de pertenencia de las premisas tienen un límite superior de manera que $\dot{h}_i(z(t)) \leq \varphi_i$, donde φ_i son constantes positivas dadas $i = 1, \dots, r$.

Consideración 3.2. Las funciones de Lyapunov locales cuadráticas $x^T P_i x$, $i = 1, \dots, r$ están proporcionalmente relacionadas de manera que $P_j = \alpha_{ij} P_i$ para $i, j = 1, \dots, r$, donde $\alpha_{ij} \neq 1$ y $\alpha_{ij} > 0$ para $i \neq j$, y $\alpha_{ij} = 1$ para $i = j$.

Teorema 3.1. A partir de las Consideraciones 3.1 y 3.2, el sistema difuso (14) se puede estabilizar a partir del controlador PDC (10) si existen φ_ρ , α_{ij} para $i, j, \rho = 1, \dots, r$ matrices definidas positivas P_1, P_2, \dots, P_r y matrices F_1, F_2, \dots, F_r tales que

$$P_i > 0, \quad i = 1, \dots, r, \quad (16)$$

$$\sum_{\rho=1}^r \varphi_\rho P_\rho + (G_{ij}^T P_i + P_i G_{jj}) < 0, \quad i, j = 1, \dots, r \quad (17)$$

$$\left(\frac{G_{jk} + G_{kj}}{2} \right)^T P_i + P_i \left(\frac{G_{jk} + G_{kj}}{2} \right) < 0 \quad (18)$$

$\forall i, j, k \in \{1, \dots, r\}$ tal que $j < k$,

donde $G_{jk} = A_j - B_j F_k$ y $G_{jj} = A_j - B_j F_j$. Una función candidata de Lyapunov está definida como

$$V(x(t)) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))x^T(t)P_i x(t). \quad (19)$$

La demostración completa del Teorema 3.1 se encuentra en Abdelmalek et al. (2007).

3.3. Diseño del observador

En la práctica no es posible medir todos los estados de un sistema y es necesario diseñar un observador para implementar la ley de control (10). Si los pares (A_i, C_i) son observables, el sistema difuso (1) es llamado localmente observable. Basados en la estructura PDC, el observador de estados tiene la forma

$$\begin{aligned} \text{Regla } i: \quad & \text{Si } z_1(t) \text{ es } M_{i1} \text{ y } \dots \text{ y } z_g(t) \text{ es } M_{ig} \\ \text{Entonces } & \hat{x}(t) = A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t)) \\ & \hat{y}_i(t) = C_i \hat{x}(t), \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (20) \end{aligned}$$

donde L_i ($i = 1, 2, \dots, r$) es la ganancia del observador para la i -ésima regla. Al incluir el observador, el controlador difuso toma la siguiente forma en lugar de (10)

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))F_i \hat{x}(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = - \sum_{i=1}^r h_i(z(t))F_i \hat{x}(t), \quad (21)$$

mientras que el observador satisface

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t))] \quad (22)$$

La salida final es

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))C_i \hat{x}(t). \quad (23)$$

Se utilizan los mismos pesos $w_i(z(t))$ que se emplearon en el sistema difuso (2). El diseño del observador difuso consiste en encontrar las ganancias L_i que se utilizan en los consecuentes de las reglas. Al reemplazar (21) en (2) y al definir que $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, se obtiene

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))[(A_i - B_i F_j)x(t) + B_i F_j \hat{x}(t)], \quad (24)$$

La ecuación del controlador en lazo cerrado es

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))(A_i x(t) - B_i F_j \hat{x}(t)), \quad (25)$$

Al sustituir $y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))C_i x(t)$ y (23) en (22) se obtiene

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) = & \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ & + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))L_i C_i (x(t) - \hat{x}(t)), \quad (26) \end{aligned}$$

que se puede escribir como

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) = & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))[(A_i - L_i C_j)\hat{x}(t) + \\ & B_i u(t) + L_i C_j x(t)] \quad (27) \end{aligned}$$

Restando (25) de (27) se obtiene

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))(A_i - L_i C_j)\tilde{x}(t). \quad (28)$$

El diseño del observador difuso consiste en determinar las ganancias L_i , utilizando las condiciones de estabilidad del

Teorema 3.2, tal que el error en estado estacionario tienda a cero.

Teorema 3.2. La dinámica del error de observación (28) es asintóticamente estable si existen matrices definidas positivas $\mathbf{P}_{o1}, \mathbf{P}_{o2}, \dots, \mathbf{P}_{or}$ y matrices $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \dots, \mathbf{L}_r$ tal que las siguientes condiciones sean satisfechas:

$$\mathbf{P}_{o_i} > 0, i = 1, \dots, r, \quad (29)$$

$$\sum_{p=1}^r \phi_p \mathbf{P}_{o_p} + (\mathbf{G}_{jj}^T \mathbf{P}_{o_i} + \mathbf{P}_{o_i} \mathbf{G}_{jj}) < 0, i, j = 1, \dots, r, \quad (30)$$

$$\left(\frac{\mathbf{G}_{jk} + \mathbf{G}_{kj}}{2} \right)^T \mathbf{P}_{o_i} + \mathbf{P}_{o_i} \left(\frac{\mathbf{G}_{jk} + \mathbf{G}_{kj}}{2} \right) < 0 \quad (31)$$

$\forall i, j, k \in \{1, \dots, r\}$ tal que $j < k$,

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}^T(0) \\ \mathbf{x}(0) & \mathbf{P}_{o_i}^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \text{ para } i = 1, \dots, r, \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_p \mathbf{P}_{o_i} & \mathbf{W}_{ij\rho l}^T \\ \mathbf{W}_{ij\rho l} & \phi_p \mathbf{I} \end{bmatrix} \geq 0 \text{ para } i = 1, \dots, r, \quad (33)$$

donde $\mathbf{G}_{jk} = \mathbf{A}_j - \mathbf{L}_j \mathbf{C}_k$, $\mathbf{G}_{jj} = \mathbf{A}_j - \mathbf{L}_j \mathbf{C}_j$ y $\mathbf{W}_{ij\rho l} = \xi_{\rho l} (\mathbf{A}_i \mathbf{X}_i - \alpha_{ij} \mathbf{B}_i \mathbf{M}_j)$. Estas desigualdades pueden escribirse en términos de LMIs haciendo el siguiente cambio de variable

$$\mathbf{P}_{o_i} = \mathbf{X}_{o_i}^{-1}, \forall i \in \{1, \dots, r\}, \quad (34)$$

$$\mathbf{X}_{o_i} = \alpha_{ij} \mathbf{X}_{o_j}, \text{ tal que } \alpha_{ij} = 1/\alpha_{ji}, \forall i, j \in \{1, \dots, r\} \text{ y } i \neq j \quad (35)$$

$$\mathbf{L}_i = \beta_{ij} \mathbf{L}_j, \text{ tal que } \beta_{ij} = 1/\beta_{ji}, \forall i, j \in \{1, \dots, r\} \text{ y } i \neq j \quad (36)$$

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{L}_i \mathbf{C}_i \mathbf{X}_{o_i}, \forall i, j \in \{1, \dots, r\} \quad (37)$$

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

El diseño del controlador considera la configuración de cámaras mostrada en la Figura 1, el desarrollo analítico de este modelo puede encontrarse en detalle en Bueno et al. (2013). No se utiliza el modelo del robot para diseñar el controlador. El objetivo de control es hacer que el efector final siga una trayectoria establecida que se genera con un campo de velocidad. Las entradas son obtenidas mediante el procesamiento de las imágenes adquiridas por las cámaras, y las salidas corresponden a los torques aplicados a cada una de las articulaciones. El procedimiento de diseño es el siguiente:

1. Seleccionar las funciones de pertenencia para el sistema no lineal y las reglas de la planta (1).
2. Obtener las matrices \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i y \mathbf{C}_i .
3. Establecer un modelo de referencia o trayectoria a seguir.
4. Obtener las ganancias \mathbf{L}_i .
5. Resolver la LMI para obtener \mathbf{F}_i
6. Resolver la LMI para obtener \mathbf{P}_i .
7. Resolver la LMI para obtener \mathbf{P}_{o_i} .
8. Construir el observador difuso (20).
9. Construir el controlador difuso (21).

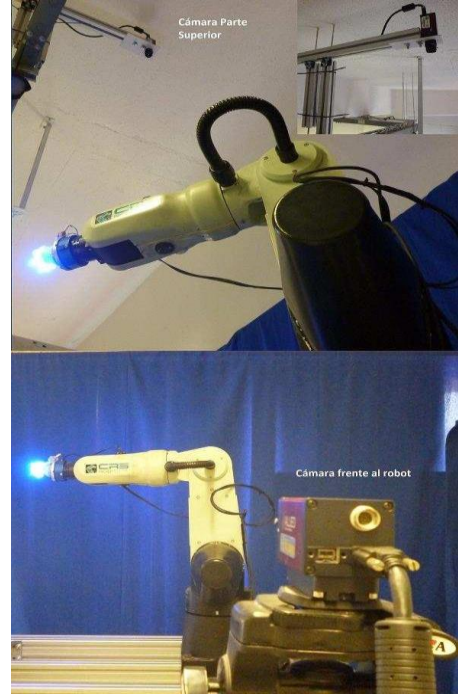


Fig. 1. Posición de las cámaras

Los siguientes estados son considerados

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 \\ y_2 \\ \dot{y}_2 \\ y_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} x_1(t) &\in [x_{1min}, x_{1max}] = [0, 1000] \\ x_2(t) &\in [x_{2min}, x_{2max}] = [-50, 50] \\ x_3(t) &\in [x_{3min}, x_{3max}] = [0, 1000] \\ x_4(t) &\in [x_{4min}, x_{4max}] = [-50, 50] \\ x_5(t) &\in [x_{5min}, x_{5max}] = [0, 1000] \\ x_6(t) &\in [x_{6min}, x_{6max}] = [-50, 50] \end{aligned}$$

Los máximos y mínimos valores de las variables de estado son definidas con base en imágenes adquiridas. x_1, x_3 y x_5 son tomadas directamente de las cámaras y x_2, x_4 y x_6 son estimadas por el observador. El modelo T-S es dado por el siguiente conjunto de reglas cuyas funciones de pertenencia tienen forma triangular. Las variables en las premisas son el error de seguimiento y la velocidad en coordenadas de imagen.

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - y_{d1} \\ y_2 - y_{d2} \\ y_3 - y_{d3} \end{bmatrix}, \quad (38)$$

donde y_1, y_2 y y_3 representan la posición del efector final obtenida a través de la cámara y y_{d1}, y_{d2} y y_{d3} representan la trayectoria deseada. Para el procedimiento de diseño es

necesario representar la dinámica no lineal del robot por un modelo difuso, en este caso del tipo T-S. Para minimizar el diseño y complejidad, se emplean la menor cantidad de reglas posibles.

- Regla 1: Si Δy_1 es M_{11} y Δy_2 es M_{21} y Δy_3 es M_{31}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_1x(t) + B_1u(t), y = C_1x(t)$
- Regla 2: Si Δy_1 es M_{11} y Δy_2 es M_{22} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_2x(t) + B_2u(t), y = C_2x(t)$
- Regla 3: Si Δy_1 es M_{11} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_3x(t) + B_3u(t), y = C_3x(t)$
- Regla 4: Si Δy_1 es M_{12} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_4x(t) + B_4u(t), y = C_4x(t)$
- Regla 5: Si Δy_1 es M_{12} y Δy_2 es M_{22} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_5x(t) + B_5u(t), y = C_5x(t)$
- Regla 6: Si Δy_1 es M_{12} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_6x(t) + B_6u(t), y = C_6x(t)$
- Regla 7: Si Δy_1 es M_{13} y Δy_2 es M_{21} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_7x(t) + B_7u(t), y = C_7x(t)$
- Regla 8: Si Δy_1 es M_{13} y Δy_2 es M_{22} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_8x(t) + B_8u(t), y = C_8x(t)$
- Regla 9: Si Δy_1 es M_{13} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{32}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_9x(t) + B_9u(t), y = C_9x(t)$
- Regla 10: Si Δy_1 es M_{11} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{31}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_{10}x(t) + B_{10}u(t), y = C_{10}x(t)$
- Regla 11: Si Δy_1 es M_{11} y Δy_2 es M_{22} y Δy_3 es M_{31}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_{11}x(t) + B_{11}u(t), y = C_{11}x(t)$
- Regla 12: Si Δy_1 es M_{11} y Δy_2 es M_{22} y Δy_3 es M_{33}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_{12}x(t) + B_{12}u(t), y = C_{12}x(t)$
- Regla 13: Si Δy_1 es M_{12} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{33}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_{13}x(t) + B_{13}u(t), y = C_{13}x(t)$
- Regla 14: Si Δy_1 es M_{13} y Δy_2 es M_{23} y Δy_3 es M_{33}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_{14}x(t) + B_{14}u(t), y = C_{14}x(t)$
- Regla 15: Si Δy_1 es M_{13} y Δy_2 es M_{21} y Δy_3 es M_{33}
 Entonces $\dot{x}(t) = A_{15}x(t) + B_{15}u(t), y = C_{15}x(t)$

Las funciones de pertenencia se presentan en la Figura 2 y se ajustan según los siguientes valores: $d_1 = -400, d_2 = 0, d_3 = 400, d_4 = -200, d_5 = 0, d_6 = 200$. El número de reglas ha sido seleccionado después de un proceso de simulación y descartando alguno casos que no se presentarían.

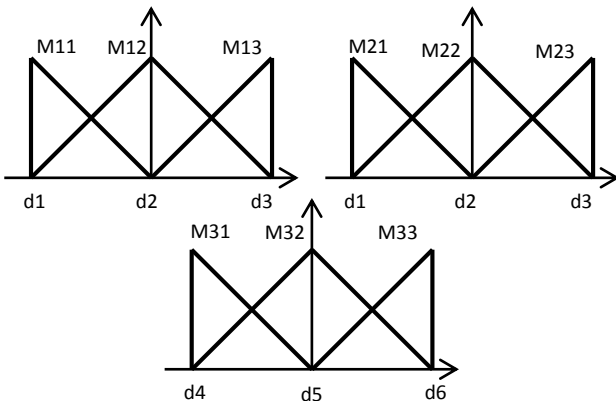


Fig. 2. Funciones de pertenencia

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se ha realizado un conjunto de experimentos para verificar el correcto funcionamiento del controlador diseñado empleando el sistema de pruebas mostrado en la Figura 4. El banco de pruebas utilizado está compuesto por un robot industrial A465de CRS Robotics. Si bien tiene seis grados de libertad solo se utilizan las articulaciones 1, 2 y 3. El sistema visual consiste de dos cámaras monocromáticas CCD (PikeF – 505B). La máxima resolución de las cámaras es 2452×2054 pixels a 15 fps. Los datos adquiridos con el sistema de visión son enviados vía FireWire a una computadora donde se procesan. Un objeto de forma esférica se fija al efector final del robot manipulador y la imagen adquirida por la cámara es procesada en Microsoft Visual C ++ 6.0 para obtener su centroide. Para generar la trayectoria se eligió un algoritmo basado en campos de velocidad, el cual tiene la ventaja de no depender del tiempo, este queda definido de la siguiente manera

$$\dot{y}_d = v(y) = -\frac{k_0}{\|y\| + \epsilon} \tilde{y} - k_1(y_d - y_f), \quad (39)$$

donde k_0, k_1 y son constantes positivas. y_d es obtenida al integrar la ecuación (39) con $y_d(0) = y(0)$. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran las trayectorias deseadas y reales en coordenadas de imagen. Con los experimentos se ha demostrado que el controlador diseñado lleva al efector final a la posición deseada en coordenadas de imagen, garantizando la convergencia a cero de los errores de seguimiento y de observación. Las tres coordenadas de imagen utilizadas convergen a su valor deseado en poco tiempo. El seguimiento en la coordenada 3 no es el mejor, esto se debe a la selección de los valores de las funciones de pertenencia, si los conjuntos difusos se hacen más pequeños esto mejorara aunque sería necesario utilizar más reglas. A pesar de esto el controlador garantiza que se alcanza el punto final deseado. Los voltajes en cada uno de los motores se muestran en la Figura 6.

Los valores de los parámetros utilizados en el controlador han sido obtenidos empleando MATLAB, una explicación de esto se encuentra en Bueno-López y Arteaga-Pérez (2013).

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un control difuso servovisual en 3D para robots manipuladores de 3 grados de libertad, junto con el diseño de un observador difuso para estimar la velocidad de las coordenadas de imagen. El estudio de observadores difusos ha sido limitado hasta el momento, lo que hace que el algoritmo propuesto represente un avance significativo en el área. El modelo Takagi-Sugeno permite describir de manera correcta la dinámica del robot, lo que es esencial para el diseño del controlador. Por medio de experimentos se muestra el buen desempeño de la estrategia propuesta. El seguimiento de trayectoria puede mejorarse con la implementación de más reglas, aunque esto implica mayor costo.

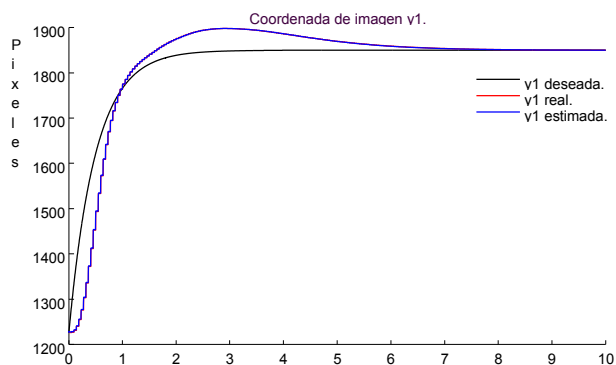


Fig. 3. Trayectoria de la coordenada y1.

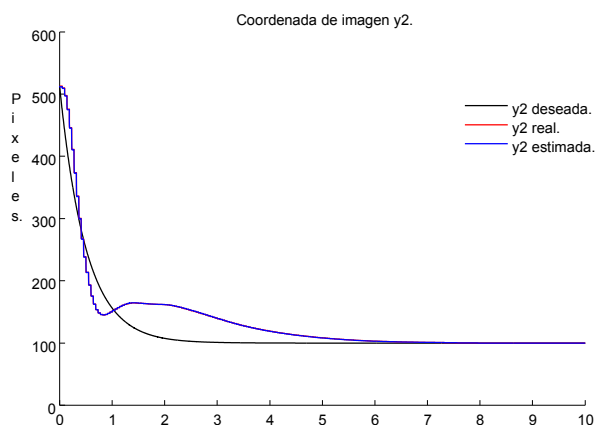


Fig. 4. Trayectoria de la coordenada y2

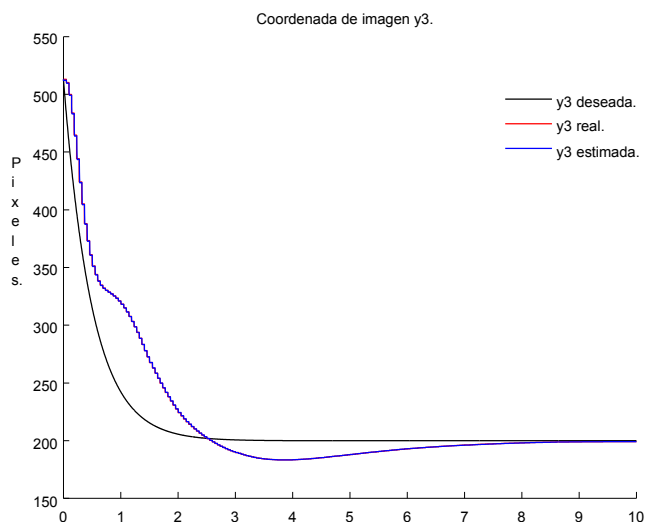


Fig. 5. Trayectoria de la coordenada y3

Referencias

Abdelmalek, I., Golea, N., Hadjili, M. L. (2007). A new fuzzy Lyapunov approach to non quadratic stabilization of takagi-sugeno fuzzy models. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 17, 39–51.

Alavandar, S., Nigan, M. (2008). Adaptive neuro-fuzzy inference system based of six DOF robot manipulator. *Engineering Science and Technology Review* 1(2), 106-111.

Bernal, M., Guerra, T. M., (2010). Generalized nonquadratic stability of continuous time Takagi Sugeno models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 18 (4), 815-822.

Bueno-López M., Arteaga Pérez M. y Candea A. (2013). Modelado de sistemas de visión en 2D y 3D: un enfoque hacia el control de robots manipuladores. *Tecnura*, 17 (37), 12-21.

Bueno-López M. and Arteaga Pérez M. (2013). Fuzzy vs Nonfuzzy in 2D Visual Servoing for Robot Manipulators. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10 (108), 1-11.

Chaumette, F., Hutchinson, S. (2006). Visual servo control. Part I: Basic approaches. *IEEE Robotics Automation Magazine* 13 (4), 82–90.

Choi, H. H. (2007). LMI-based nonlinear fuzzy observer-controller design for uncertain mimo nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15 (5), 956-971.

H.Wang, Tanaka, K., Griffin, M. F. (1996). An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues. *IEEE Transions on Fuzzy Systems* 4(1), 14–23.

Hwang, J. P., Kim, E. (2006). Robust tracking control of an electrically driven robot: Adaptive fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(2), 223-247.

Liu, C., Cheach, C. C., Slotine, J.-J. (2006). Adaptive Jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information. *Automatica*, 42(9), 1491-1501.

Lizarralde, F., Hsu, L., Costa, R. (2008). Adaptive visual servoing of robot manipulators without measuring the image velocity. *17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Seoul, Korea.

Chaumette, F., Hutchinson, S (2007). Visual servo control. Part II: Advanced approaches. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 14(1), 109–118.

Takagi, T., Sugeno, M., (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15 (1), 116-132.

Tanaka, K., Sugeno, M., (1992). Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy sets and systems*, 45(2), 135-156.

Tanaka, K., Wang, H., (2001). *Fuzzy Control Systems Design and Analysis. A Linear Matrix Inequality Approach*. John Wiley and Sons.

Tayebia, A., Islam, S., (2006). Adaptive iterative learning control for robot manipulators: Experimental results. *Control Engineering Practice* 14(7), 843–851.

Weng, H., Liu, Y. H., Chen, W., (2010). Uncalibrated visual tracking control without visual velocity. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(6), 1359-1370.