

## Control de posición de un carro horizontal usando retroalimentación visual

Francisco Antonio Rogelio, Arellano Verdejo Javier, Arellano Mejía José Antonio,  
Zamora Pichardo Julio

Div. de Ing. Mecatrónica, TESE, Av. Tecnológico Esq. Av. Central, 55210, Ecatepec, Edo. de México, email:  
rfrancisco@tese.edu.mx, javier\_arellano\_verdejo@hotmail.com, antareme@hotmail.com,  
juliozamorap@yahoo.com.mx

### Resumen

*En este trabajo se presenta el diseño, construcción e implementación de un prototipo mecánico para el control de posición cuando está sujeta a una retroalimentación visual. Este prototipo se emplea principalmente para el seguimiento de un objeto mediante una retroalimentación visual. La prueba se realiza en tiempo real.*

**Palabras claves:** Control, visión por computadora, lógica difusa, retroalimentación.

### 1. Introducción

Hoy en día, las necesidades industriales son altamente exigentes y esto requiere de equipos especializados para un buen funcionamiento de las industrias. Uno de los elementos que han tenido impacto son los robots industriales. Una de las limitaciones de estos robots es que tienen un bajo impacto en aplicaciones donde el ambiente de trabajo y la colocación de objetos no puede ser completamente controlada, esto es debido a la capacidad limitada de los sensores utilizados para obtener información referente al entorno de trabajo. Los robots industriales actuales generalmente tienen la gran desventaja de no poder observar las tareas que realizan, además de requerirse tiempos de puesta a punto largos debido a la programación manual de las tareas a realizar. Es conocido que la capacidad de los sensores utilizados incrementa o disminuye la versatilidad y el campo de aplicación de los robots.

La visión es un sensor muy práctico ya que dentro de ciertos límites imita la visión humana y permite una medición del ambiente de trabajo sin un contacto directo con éste. Tradicionalmente, el uso de los sensores de visión y la manipulación del robot se combinan en un modelo de lazo abierto, esto es, la posición del objeto a manipular en el espacio de trabajo se obtiene a través del sistema de visión, posteriormente, una secuencia de movimientos es planeada y ejecutada. Este modelo es conocido como Look then Move (ver y después mover).

Una plataforma de visión por computadora consiste en incorporar a un sistema dinámico un sensor externo, como lo es una cámara de video encargada de obtener información visual que sea usada para controlar al sistema. Esta técnica es conocida así ya que incorpora al sistema dinámico mayor flexibilidad y la capacidad de obtener información de su entorno.

La visión por computadora utiliza las imágenes capturadas por las cámaras y la procesa mediante un conjunto de algoritmos diseñados específicamente para extraer la información relevante [9]. Esta se usa para manipular al sistema dinámico y realizar la tarea asignada.

El incremento en la velocidad de procesamiento de las computadoras y su bajo costo han permitido el desarrollo de nuevas plataformas de visión cuyo diseño tiene como objetivo tener una respuesta de control rápida y un tiempo de retardo pequeño [2].

La mayoría de los sistemas de control con retroalimentación se valen de un conjunto de sensores para medir las variables físicas del entorno en el cual actúan, dichos sensores son de una amplia gama como por ejemplo, sensores de presión, temperatura, velocidad, aceleración, posición, luminosidad, etc. Sin embargo, la cantidad de problemas que requieren una solución de control ha ido en aumento, trayendo consigo un incremento en las necesidades de cuidado para la determinación de las características del ambiente.

El objetivo de la Visión por Computadora es transformar las imágenes adquiridas y procesadas digitalmente, transformándolas en información útil y que pueda ser utilizada para representar conocimiento, que a su vez y con el empleo de un sistema de control adecuado, permitan tomar decisiones de las acciones a tomar en un determinado proceso o sistema.

En este artículo describe el diseño, modelado, construcción y control de un sistema mecatrónico con retroalimentación por visión para su empleo en el seguimiento de un objeto. El sistema de control será implementado utilizando lógica difusa, por lo que se provee de un mecanismo que en función del error, emite la señal de control correspondiente para la actuación del sistema. La señal de retroalimentación es realizada por medio de una cámara que toma la posición, y después de hacer diferencia de centroides se toma la decisión del control para el seguimiento del objeto.

El artículo está dividido en las siguientes partes: en la sección 2 se describen los fundamentos teóricos. Se describen el sistema y sus partes fundamentales como es el prototipo, el modelo matemático, la ley de control y la tarjeta de adquisición de datos en la sección 3. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos. Finalmente en la sección 5 se dan las conclusiones de los resultados obtenidos y trabajos futuros.

## 2. Fundamentos teóricos

Una plataforma de estéreo visión incorpora un par de sensores externos al sistema (cámaras de video) por lo que es posible trabajar en tres dimensiones. Esto permite realizar otro tipo de tareas como calcular la ubicación de un punto en el espacio o efectuar la reconstrucción de objetos. A continuación se describe los elementos fundamentales de la plataforma:

### *Tipos de cámaras de video*

- Cámaras analógicas: Estos dispositivos son susceptibles a ruidos e interferencias debido a la conexión entre la cámara y la tarjeta de adquisición de datos, la cual realiza la conversión de la señal analógica a digital.
- Cámaras digitales: En estos mecanismos la conversión de la señal analógica a digital es efectuada por la cámara, lo cual implica que existe poco ruido. La velocidad de captura de imágenes puede ser mayor que en las cámaras analógicas. Son más costosas que las analógicas.

### *Configuraciones de la cámara*

- Configuración de cámara en mano: En esta estructura, la cámara se coloca sobre el órgano terminal del robot manipulador, lo que permite tener información visual de su espacio de trabajo.
- Configuración de cámara fija: Aquí, la cámara se acomoda en un lugar fijo donde se pueda obtener información visual del robot completo y de su espacio de trabajo (todo o una parte).

### *Tipos de control visual dependiendo del uso de la información visual*

- Control estático: Se hace uso de la información visual una sola vez para determinar la posición deseada del órgano terminal del robot manipulador.
- Control dinámico: Este hace uso de la información visual continuamente para controlar al robot [4] y depende de los valores del estado del sistema [5].

### *Tipos de arquitectura dependiendo del lazo de retroalimentación*

Esta clasificación fue presentada por primera vez en [8].

- Ver y Mover: Esta estructura tiene dos lazos de retroalimentación, por un lado el lazo del sistema de visión por computadora provee los datos que serán usados como referencia por el otro lazo que está a nivel articular.
- Control visual: Esta estructura tiene solo un lazo de retroalimentación, en el cual, usando la información visual se estabiliza el robot calculando directamente las acciones de control para las articulaciones.

### *Tipos de control dependiendo la información que recibe el controlador*

- Control basado en la posición:* En esta estrategia las características son obtenidas de la imagen y usadas junto con modelos conocidos del sistema, como lo son: el modelo cinemático del robot manipulador, el de la cámara y el modelo geométrico del objeto a alcanzar, con el fin de determinar la posición de dicho objeto con respecto al órgano terminal del robot manipulador. La retroalimentación es utilizada para reducir el error de posicionamiento. Este enfoque no es adecuado para ambientes no estructurados, debido a que se requiere información a priori.
- Control basado en la imagen:* En este las mediciones para calcular la acción de control son obtenidas directamente de las características obtenidas de la imagen. El objetivo de control es hacer al error (entre el órgano terminal y el objeto a alcanzar) en la imagen igual a cero.

## 3. Descripción del diseño del sistema

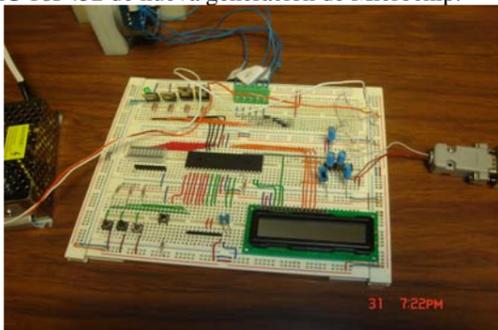
Los sistemas de control actuales requieren de una serie de sensores para poder llevar a cabo la retroalimentación al sistema, la visión por computadora ha ido adquiriendo día a día una posición alternativa y barata en los sistemas siendo una alternativa a los sistemas de sensado tradicionales. El diseño de un sistema de control con

retroalimentación por visión constituye un avance en esta área. Ahora nos hacemos la construcción de un sistema retroalimentado por visión a partir de elementos como cámaras de uso común.

El sistema desarrollado se muestra en el siguiente diagrama a bloques, como se puede apreciar se encuentra compuesto principalmente de tres elementos, el sistema mecánico, la interfaz de comunicación o sistema electrónico y finalmente el sistema de control, que para efectos de este artículo se ha propuesto un sistema de control proporcional basado en lógica difusa.

### 3.1. Tarjeta de adquisición de datos y el controlador

Para la comunicación de la PC con el dispositivo mecánico, se desarrolló una pequeña tarjeta de adquisición de datos que tiene como función principal el poder manipular desde Matlab el carro del prototipo mecánico. Para el desarrollo de esta tarjeta, se utilizó como base el Microcontrolador PIC 18F452 de nueva generación de Microchip.

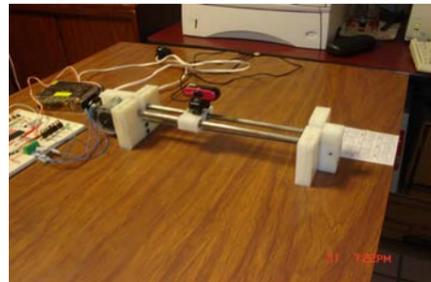
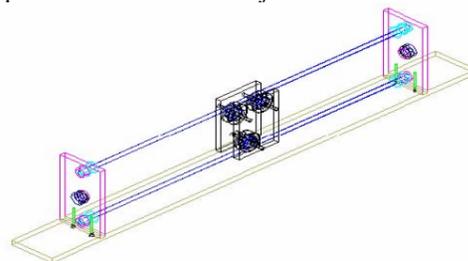


El firmware del Microcontrolador fue programado en lenguaje C, implementado mediante el RS232, dicho protocolo es utilizado de manera conjunta con Matlab para enviar las instrucciones al dispositivo. El microcontrolador es comunicado con la PC utilizando el circuito MAX232 que permite adecuar los niveles de voltaje para trabajar con el protocolo serie RS232. Por otro lado desde Matlab, se desarrolla una aplicación donde es posible comunicarse de forma serial con la tarjeta de adquisición y mediante el firmware se envían las instrucciones necesarias para que el dispositivo mecánico pueda actuar en función de lo procesado por el sistema de control difuso.

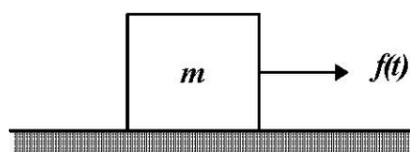
El Microcontrolador interpreta las instrucciones proporcionadas por el protocolo y en base a ellas determina el número de pasos que han de ser enviados a un motor que funciona bajo este sistema, a través de un sistema electrónico de potencia son transferidos los impulsos para que el motor pueda moverse y mediante una transmisión polea-banda pueda mover el carro de la máquina.

### 3.2. Prototipo mecánico y modelo matemático

En la siguiente figura se ilustra el prototipo que se utiliza en este trabajo



El sistema puede considerarse de la siguiente forma



donde  $m$  es la masa del carro,  $f(t)$  es la fuerza que mueve la masa. En este sistema se desprecia la fricción debido a que se considera un material apropiado y además, se puede garantizar que el control es robusto ante estas pequeñas perturbaciones.

El modelo matemático que describe el comportamiento del sistema es

$$\ddot{x}(t) = f(t)$$

$x$  es la posición. Haciendo el cambio de variable de  $x_1$  y  $x_2$ , se puede representar en espacios de estado como:

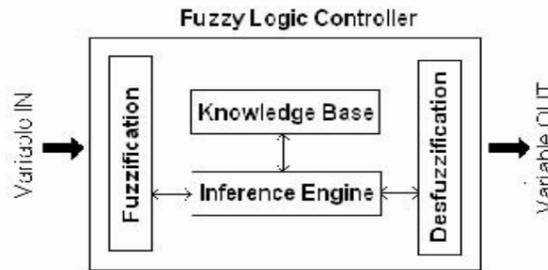
$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= u(t),\end{aligned}$$

Ahora nuestro trabajo es encontrar la ley de control  $u(t)$  más adecuada para el control de la posición. Claramente se observa que el modelo matemático es un doble integrador, el cual la teoría de estabilidad es bien conocida en la teoría de control.

### 3.3. Sistema de control difuso

Una de las principales características de una red neuronal o red difusa consiste en simular las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales. La lógica difusa es una teoría relacionada con clases de objetos en límites y cantidades de grado. Es decir, genera reglas que pueden tener una respuesta suave y esto nos da un nivel de inexactitud o flexibilidad ya que es tolerante al error.

La arquitectura básica de un sistema de control difuso tiene la siguiente forma



El parte fundamental de un sistema de control difuso es la base de reglas borrosas que se encuentran formadas por una colección de reglas con la forma: Si  $x1 = \langle v1 \rangle$  y  $x2 = \langle v2 \rangle$  Entonces  $y = \langle g \rangle$ . Esta estructura es conocida como borroso puro o de tipo Mamdani. Otro formato frecuente de reglas es el llamado de tipo Sugeno cuyas reglas tienen el siguiente formato: Si  $x1 = \langle v1 \rangle$  y  $x2 = \langle v2 \rangle$  Entonces  $y = f(x)$ .

Para nuestro sistema de control difuso se toman los siguientes criterios: La evaluación de reglas se realiza por el criterio del mínimo

$$\cup F_1(x) \dots \cup F_n(x) = \min \{ \cup F_1(x) \dots \cup F_n(x) \}$$

La implicación borrosa se realiza por la regla del mínimo

$$\cup A \rightarrow B(x, y) = \cup F_1(x) \dots F_n(x) \rightarrow G(x, y) = \min \{ \cup F_1(x) \dots F_n(x) \cup G(y) \}$$

El conjunto de salida de cada regla se calcula utilizando la ecuación:

$$\cup B(y) = SUP(xE \cup) [ \cup F_1(x) \dots F_n(x) ] \rightarrow G(x, y) * \cup A(x)$$

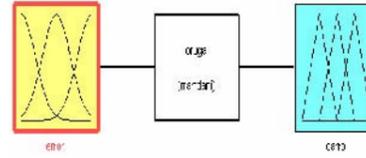
Utilizando un borrosificador singleton se cumple que  $\cup A(x') = 1$  solo para  $x' = x$  y  $\cup A(x') = 0$  para los otros y obtenemos

$$\cup B(y) = \min [ \cup F_1(x) \dots F_n(x) \cup G(y) ]$$

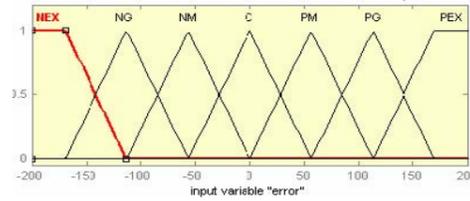
El valor final de salida se calcula utilizando la media de centros.

### 3.4. Diseño del sistema de control difuso con Matlab

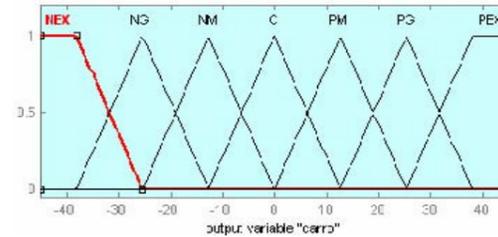
Utilizando el Fuzzy Tool Box de Matlab, se desarrolla el sistema de control difuso, para lo cual se tomaron como entrada dos variables lingüísticas, la primera la posición del carro y la segunda la posición del objeto y la salida del sistema, será la nueva posición del carro, dicha posición se transmitirá a la tarjeta de adquisición y esta se encarga de la actuación del mecanismo para posicionar al carro, tal como se muestra en la siguiente imagen:



Se utilizan funciones de tipo trapecio y triangular para constituir a los conjuntos difusos que componen a la variable lingüística como se muestra en las siguientes imágenes:



El error es la diferencia entre el centroide actual y el centroide deseado. El centroide deseado está en función directa de la posición de la cámara con respecto al objeto



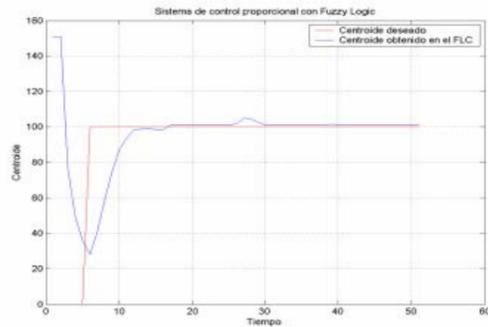
Las reglas para la base de conocimientos o inferencia esta compuesta por cinco reglas que componen a un sistema de control proporcional como se muestra en la siguiente tabla:

- If (error is NEX) then (carro is PEX)
- If (error is PEX) then (carro is NEX)
- If (error is NM) then (carro is PM)
- If (error is C) then (carro is C)
- If (error is PM) then (carro is NM)
- If (error is PG) then (carro is NG)
- If (error is NG) then (carro is PG)

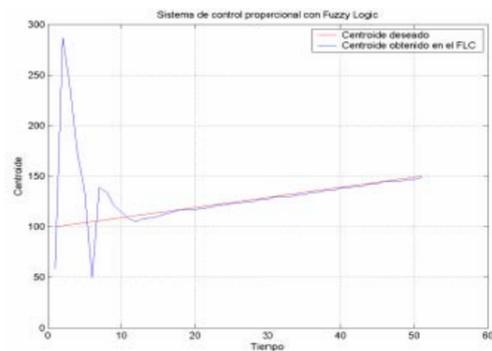
#### 4. Resultados obtenidos

A continuación se muestra el comportamiento del sistema cuando está sujeto a diferentes entradas, para este caso se analizan cuando se tiene una entrada tipo escalos y rampa. Este es el resultado del comportamiento del sistema del prototipo mecánico realizado en tiempo real, cuando se requiere medir la posición y seguimiento de un objeto.

Comportamiento del sistema cuando se tiene una entrada de tipo escalón



Comportamiento del sistema cuando se tiene una entrada de tipo rampa



#### 5. Conclusión

En este trabajo se presenta el diseño, modelado y construcción de un prototipo de un carro horizontal para el control de posición donde la retroalimentación es por medio de una cámara que nos permite identificar el movimiento y así realizar el seguimiento de su trayectoria. El diseño del control se lleva a cabo por medio de una red de control difusa conocida como mamdani. Además, los resultados obtenidos garantizan que realiza una predicción y seguimiento adecuado. A futuro se pretende implementar diferentes leyes de control donde se contemple un retardo generado por el sistema de visión.

#### Referencias

- [1]. Bell G. S., Hulls C. W., Wilson W. J., Relative End-Effector Control using Cartesian Position Based Visual Servoing, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, 1996.
- [2]. Castillo G. P., Plataforma de Control Visual Para Servomecanismos, Tesis de Maestría, CINVESTAV-IPN., 2000.
- [3]. Corke P. I., Hager G. D., Hutchinson S., A tutorial on Visual Servo Control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, 1996.
- [4]. Isidori A., *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag, London, 1995.
- [5]. Hashimoto K., Kimura H., Visual Servoing with Nonlinear Observer, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 458-498, 1995.
- [6]. Kelly R., Reyes F., Experimental Evaluation of Fixed-Camera Direct Visual Controllers on a Direct-Drive Robot, *International Conference on Robotics and Automations*, Leuven, Belgium, 1998.
- [7]. Papanikolopoulos N. P., Kholsa P. K., Adaptive Robotic Visual Tracking: Theory and Experiments, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, No. 5, 1993.
- [8]. Sanderson A. C., Weis L. E., Image-Based visual Servo Control using Relational Graph Error Signal, *Proc. IEEE*, 1074 - 1077, 1980.
- [9]. Trucco E., Verri A., *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, 1998.