

Diseño e Implementación de un control difuso experto para la dirección de un vehículo de cuatro ruedas.

Chen D., Torres P.

Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica

15 de enero de 2007

Resumen

En este trabajo un control experto difuso de dirección basado en reglas es diseñado e implementado en un vehículo de cuatro ruedas dotado de dos tarjetas de adquisición de datos y una tarjeta de procesamiento utilizando la tecnología dsp¹, [1],[2]. Los resultados son presentados para implementación en tiempo real de la estrategia, se realizan comentarios y análisis para el caso regulatorio y cambios de referencia en forma de escalón describiendo una trayectoria cuadrada, se discuten también aspectos favorables de la implementación y sus posibilidades en el seguimiento de trayectorias más complejas, y bajo que condiciones es posible lograr esto, (dado que el control es de dirección).

1. Introducción

El control de vehículos móviles de 4 ruedas siempre ha sido de gran interés, esto debido a las numerosas aplicaciones que tiene. Un problema particular interesante de resolver consiste en controlar un vehículo de tal forma que éste siga una dirección de referencia predeterminada, con la cual se pueden formar distintas trayectorias, por ejemplo, una línea recta, una línea curva o una circunferencia. Aplicaciones de este problema se pueden

encontrar en la automatización del desplazamiento de máquinas cosechadoras o de tractores mineros. En [1] se desarrolla e implementa la tarjeta de procesamiento de datos utilizando un dsp de la serie C28x, se explica la estructura de funcionamiento de los bloques de programación del dispositivo y su interacción con las tarjetas de adquisición. [2] trata sobre el desarrollo de las tarjetas de adquisición de datos por separado, (montadas sobre el dsp de la serie F24x), y su interacción con los sensores, utilizando protocolo I2C. Se explican además los protocolos de transmisión a la placa central, (CAN). En [3], se entregan todas las características eléctricas y mecánicas de la brújula utilizada, se detallan también los procedimientos necesarios en la calibración. En [4], se detallan las características eléctricas y mecánicas del dsp TMS320F2810. Finalmente en [5], se entregan aspectos introductorios de lógica difusa de tipo 1 y 2 y su aplicación a robótica.

2. Diseño e Implementación

El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un controlador sobre un vehículo autónomo de 4 ruedas de tal forma que pueda seguir una dirección de referencia. El sistema a controlar cuenta con una brújula electrónica, un servo motor para controlar

¹Digital Signal Processing

la dirección y un motor de continua para la tracción. El sistema *vehículo de cuatro ruedas*, es considerado como un sistema SISO en donde la variable de entrada al sistema, (variable manipulada), es el ángulo de orientación del servo motor y la de salida, (variable controlada), la dirección del vehículo.

Se diseñó un controlador de tipo difuso, cuya gran ventaja es que es aplicable sobre sistemas del tipo caja negra. Se optó por diseñar un controlador difuso simple, con tan sólo 2 conjuntos difusos de entrada y 2 de salida. La razón de no haber considerado más conjuntos difusos en la salida es que el sistema de dirección del vehículo tiene poca precisión ($\pm 10^\circ$ aprox.) y el control tiene que ser de tiempo real. La forma y parámetros de las funciones de pertenencia del fusificador se muestran en la figura 1.

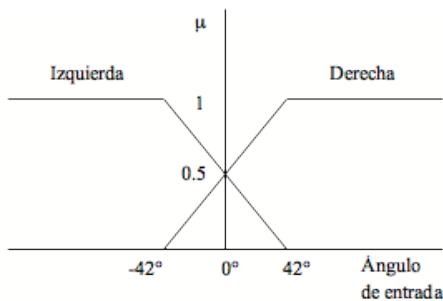


Figura 1: Definición conjuntos difusos y funciones de pertenencia de entrada

La base de reglas asociada al controlador es:

Si *ángulo de entrada* es *derecha* \Rightarrow *ángulo de salida* es *izquierda*.

Si *ángulo de entrada* es *izquierda* \Rightarrow *ángulo de salida* es *derecha*.

La forma y parámetros de las funciones de pertenencia de salida necesarias para el defusificador se muestran en la figura 2.

El servo motor funciona bajo modulación de ancho pulso. El período del tren de pulso debe ser de 20 ms, y las ruedas quedan

centradas bajo pulso de 1.5 ms de ancho. La salida del defusificador se obtiene mediante el método del centro de gravedad.

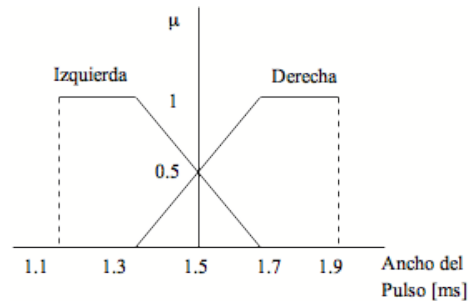


Figura 2: Definición conjuntos difusos y funciones de pertenencia de salida

3. Descripción, resultados y discusiones

3.1. Descripción del experimento y resultados

Las pruebas efectuadas en tiempo real para establecer el desempeño del controlador, fueron tres: la primera consiste en control regulatorio del vehículo, (control con respecto a una referencia angular de 0°), efectuado para condiciones iniciales de 30.938° , 57.657° y 97.031° . La segunda establece también control regulatorio pero en presencia de perturbaciones. Y la tercera, con cambio de referencia en forma escalonada para ángulos de 0° , 90° , 180° y 270° , (formando una trayectoria cuadrada), en este caso, los cambios se produjeron a los instantes de 6[s], 14[s] y 20[s] respectivamente. Se efectuó adicionalmente una prueba con cambio de referencia desde 0° a 180° en 6[s]. Dichos cambios fueron efectuados por software. Las variables de interés son almacenadas en un arreglo que posteriormente es recuperado desde MATLAB v7.0.1 R14. Los resultados obtenidos para el ángulo de orientación del vehículo en la primera prueba (variación de condiciones iniciales) son los que se muestran a continuación:

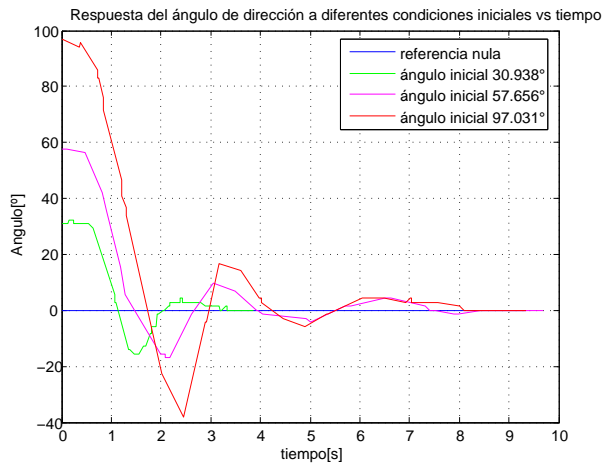


Figura 3: Gráfica comparativa de la evolución del ángulo del vehículo (grados) vs tiempo (segundos) para condiciones iniciales de 30.938° , 57.656° y 97.031° .

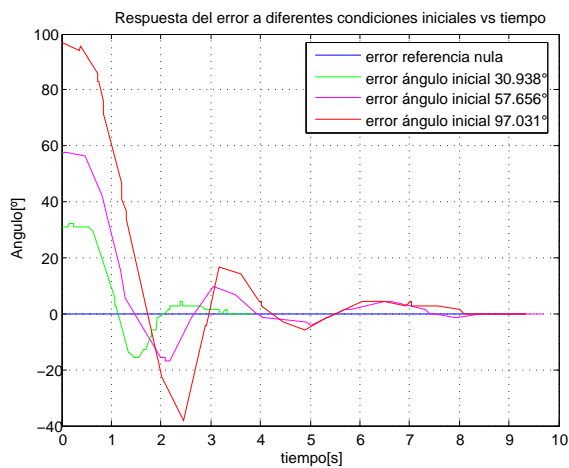


Figura 4: Evolución del error (grados) a distintas condiciones iniciales vs tiempo (segundos).

<u>Condición inicial.</u>	<u>Error RMS.</u>
30.938°	13.4218°
57.656°	21.0327°
97.031°	33.0145°

Figura 5: Error rms para el ángulo de orientación del vehículo, con diferentes condiciones iniciales.

Una gráfica de la dirección del vehículo en presencia de perturbaciones, (en la salida), se muestra a continuación, la perturbación en forma de impulso fue aplicada dos veces desviando la dirección manualmente a los 1.5[s] y a los 3[s] aprox, con una magnitud aproximada de 45° .

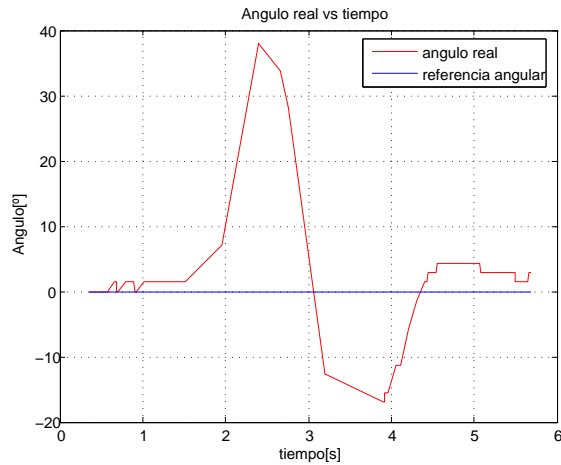


Figura 6: ángulo de orientación del vehículo (grados) vs tiempo (segundos) en presencia de perturbaciones, (en la salida).



Figura 7: Evolución del error para el ángulo de orientación del vehículo (grados) vs tiempo (segundos), en presencia de perturbaciones, (en la salida).

<u>Referencia.</u>	<u>Error RMS.</u>
0°	6.2125°

Figura 8: Error rms cometido por el ángulo del vehículo con respecto a una referencia de 0° en presencia de perturbaciones, (en la salida).

Para la tercera prueba, (trayectoria cuadrada), se muestra la evolución del ángulo de orientación del vehículo con respecto a la referencia y la evolución temporal del error. También se detalla el error rms cometido en presencia de condición inicial igual a 0, y los cambios de referencia ocurridos en los instantes antes mencionados.

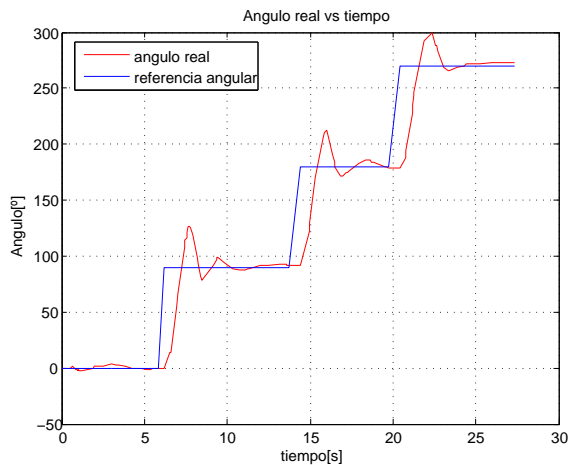


Figura 9: ángulo de orientación del vehículo (grados) vs tiempo (segundos), para una condición inicial de 0°, y con cambio de referencia de 0°, 90°, 180° y 270°.

<u>Condición inicial.</u>	<u>Error RMS.</u>
0°	26.4238°

Figura 10: Error rms cometido por el ángulo del vehículo con respecto a una referencia de 0°, 90°, 180° y 270°.

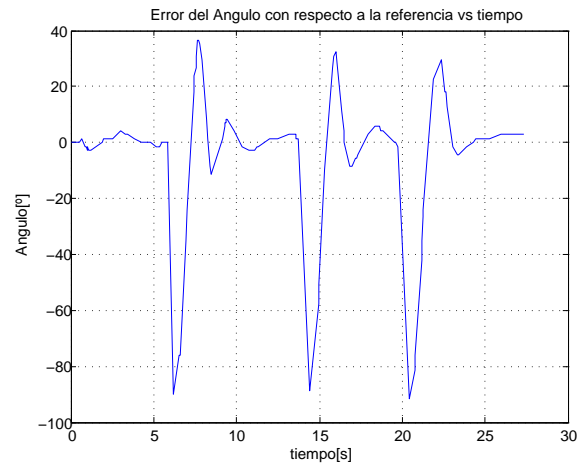


Figura 11: Evolución del error para el ángulo de orientación del vehículo (grados) vs tiempo (segundos), para una condición inicial de 0°, y con cambio de referencia de 0°, 90°, 180° y 270°.

Para el caso de cambio de la referencia en forma de escalón desde 0° a 180°, se obtuvieron los siguientes resultados para el ángulo de orientación, evolución del error y error RMS, considerando que el cambio se produce a los 6[s], (descripción de una trayectoria del tipo *ida y vuelta*):

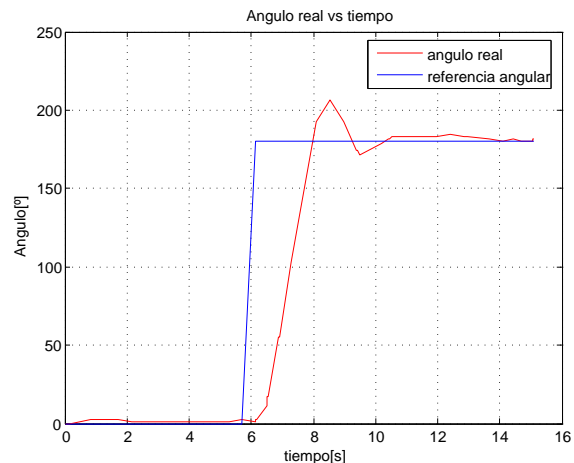


Figura 12: ángulo de orientación del vehículo (grados) vs tiempo (segundos), para una condición inicial de 0°, y con cambio de referencia de 0° y 180°.

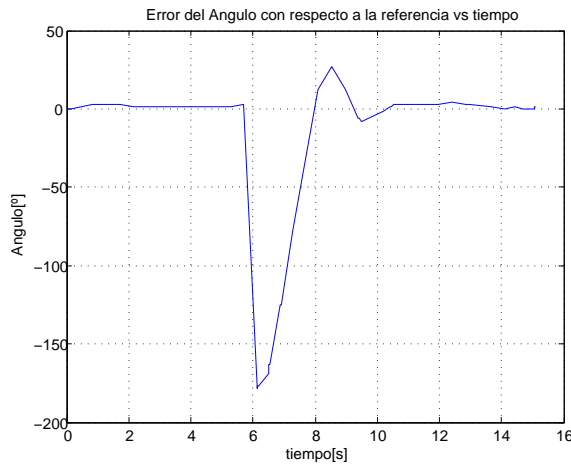


Figura 13: Evolución del error para el ángulo de orientación del vehículo (grados) vs tiempo (segundos), para una condición inicial de 0° , y con cambio de referencia de 0° y 180° .

<u>Condición inicial.</u>	<u>Error RMS.</u>
0°	57.7911°

Figura 14: Error rms cometido por el ángulo del vehículo con respecto a una referencia de 0° y 180° .

3.2. Bases de Evaluación

La base de evaluación utilizada en este caso corresponden al análisis de la respuesta del sistema con respecto a la referencia en: Tiempo de estabilización y Sobrepasso, así como de la evolución temporal del error y el error cuadrático medio *RMS* definido como sigue:

$$e(n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (a(k) - ref(k))^2}$$

Donde:

- $a(k)$: dirección del vehículo en el instante k .
- $ref(k)$: dirección de referencia en el instante k .
- n : número de datos.

3.3. Discusión

Se observa en el caso del control regulatorio que la respuesta del sistema es en efecto dependiente de las condiciones iniciales, (véase figura 3), mostrando un tiempo de estabilización muy similar a $8.3[s]$ aproximadamente en los casos de ángulos iniciales parecidos a 90 y 60 grados y menor en el caso en que el ángulo inicial es cercano a 0° , (inicial $\approx 30^\circ$), siendo este de aproximadamente $3.3[s]$. Se observa en los tres casos que la respuesta del sistema converge efectivamente al ángulo 0° de referencia, consistentemente el error también converge a 0° . Para el caso de perturbaciones, aunque la respuesta no converge completamente a los 0° de referencia después de aplicada la perturbación, el control fue capaz de mantener la dirección acotada como es mostrado en la figura 6. En el caso de la respuesta para los cambios de referencia en forma de escalón, (seguimiento trayectoria cuadrada), se observa que la respuesta del ángulo de orientación converge a la referencia, (ver figura 9). En algunos intervalos de tiempo es posible apreciar que el auto converge a la referencia pero no completamente, esto por que los cambios de referencia efectuados ocurren en tiempos menores a $8[s]$. El error por su parte describe trayectorias entorno a 0° . Para cambios de referencia de 0° a 180° se observa (figura 12), que la dirección del vehículo converge a los 180° . Cabe destacar que este caso es de suma importancia por el hecho de que es la condición más exigente a la que puede ser sometida la estrategia, (básicamente se le exige al vehículo que siga la dirección opuesta a la que tenía), en concomitancia con esto, el tiempo de estabilización para este caso resultó ser el más largo de los ya registrados, ($9[s]$ aproximadamente). Notar que en la medida que se cumpla la condición de que el vehículo se desplace a velocidad constante, es posible efectuar trayectorias aproximadas por partes. En la práctica se observa que esto ocurre aproximadamente a velocidades bajas, considerando un tiempo

po de cambio de referencia constante y mayor o igual al tiempo de estabilización encontrado a los 180° , (es decir 9[s]). Esta condición asegura que el vehículo alcanza a estabilizarse en la recta aproximante entre dos puntos cualesquiera de la trayectoria, no importando que dos rectas aproximantes adyacentes describan direcciones desfasadas en un ángulo que puede ser obtuso inclusive. El hecho de que el sistema pudiese seguir cambios de referencia de 0° a 180° valida esta condición. Existe sin embargo un elemento negativo en el desempeño del controlador, y es el hecho de que a cambios de referencia en la dirección la respuesta del sistema exhibe sendas sobreoscilaciones, (ver figuras 9 y 12). Más aun, es posible apreciar de las figuras 11 y 13, (asociadas a la evolución del error), un comportamiento de *fase no mínima*, dadas las grandes oscilaciones presentes en el lado negativo del ángulo. Esto significa que el vehículo tiene la tendencia de ir en una dirección contraria que la dada por la referencia en los primeros instantes de ocurrido el cambio. Evidentemente, esta condición no es deseable para un control real de dirección. Es importante mencionar que la condición de tiempos de estabilización largos podría eventualmente mejorarse sintonizando mejor los parámetros del control, (punto de corte de las funciones de pertenencia), buscando obtener respuestas más acotadas en tiempo, sin ir en un excesivo desmedro del tamaño del sobrepaso. El problema de oscilaciones grandes y fase no mínima podría atenuarse usando información futura de la dirección del vehículo dada por la brújula construyendo un modelo predictivo a un número de pasos dados por el tiempo de estabilización, asociando funciones de pertenencia nuevas a dicha variable. Otra posible solución es incorporar nuevas funciones de pertenencia de salida o modificar las actuales para incorporar la dinámica negativa y compensarla.

4. Conclusiones

La estrategia de control experto difuso permite exitosamente controlar la dirección del vehículo de cuatro ruedas. También permite efectuar control sobre trayectorias fáciles de referencia, que pueden ser cerradas, (en particular una trayectoria describiendo un cuadrado). Es capaz de seguir cambios de referencia de 0° a 180° , (la situación de mayor exigencia). La respuesta del sistema en lazo cerrado depende de las condiciones iniciales, en particular en su tiempo de estabilización. El control es capaz de mantener la dirección del vehículo acotada ante presencia de perturbaciones en la salida. Por otro lado, la respuesta transitoria del sistema exhibe grandes oscilaciones, comportamiento de fase no mínima y tiempo de asentamiento máximo del orden de los 9[s].

Referencias

- [1] Alarcón, Claudio. Memoria de Título. Diseño e implementación de interfaz de programación para plataforma orientada al control de vehículos autónomos. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. 2006.
- [2] Ramírez, Jorge. Memoria de Título. Diseño y construcción de plataformas reprogramables de comunicación de sensores vía protocolo CAN, aplicado al control de vehículos autónomos. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. 2006.
- [3] CMPS03 Compass Datasheet
- [4] TMS320F2810 Texas Instruments DSP Datasheet
- [5] Type-2 Fuzzy Control of a Mobile Robot, MPhil/PhD Transfer Report, November 2003. Simon Coupland, *Centre for Computational Intelligence De Monfort University*, Leicester LE1 9BH, UK.