

ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO PARA EL SISTEMA DE NAVEGACIÓN DE UN ROBOT TERRESTRE*

Iván Rodrigo Luna Castro

RESUMEN

Este artículo describe el diseño de un sistema de control difuso basado en comportamiento, para la navegación de un robot móvil. El sistema de control difuso provee un mecanismo que combina los datos provenientes de los sensores del sistema de sonar del robot. Se establecen dos jerarquías para el comportamiento del sistema. El comportamiento de alto nivel consiste en la evasión de obstáculos y el sistema de bajo nivel consiste en un comportamiento de emergencia. Cada comportamiento constituye una estrategia de control autónoma basada en la "arquitectura de máquinas inteligentes".

ABSTRACT

This article aims to describe a fuzzy control system design based on behavior. This Fuzzy Control System provides a mechanism apt to combine signals coming from the robot sonar system. There are two levels for the functioning of the system: the higher level avoids the obstacles and the lower one provides an autonomous control strategy, based on the intelligent machinery architecture, for emergency behavior.

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores ultrasónicos utilizados en aplicaciones usuales de sistemas de sonar, miden el lapso de tiempo que transcurre entre la transmisión de una señal ultrasónica y la recepción del eco de la señal transmitida para determinar la distancia a un obstáculo. Los sensores ultrasónicos pueden ser utilizados en robots móviles para detectar objetos alrededor del robot y para evitar colisiones con obstáculos no esperados. Estos sensores pueden también determinar si un obstáculo está en movimiento, midiendo variaciones en la frecuencia del eco de la señal transmitida, producidas debido al efecto Doppler.

En el robot desarrollado para este proyecto, se utilizan dos pares de transductores ultrasónicos que detectan obstáculos en el frente del robot y dos pares que detectan obstáculos en movimiento utilizando el efecto dopler.

Se implementó con éxito un sistema de control difuso para la detección y evasión de obstáculos en el robot. Los sensores ultrasónicos envían datos a las entradas de los controladores difusos. El sistema de control planteado consta de cuatro entradas y dos salidas. Cada entrada y salida tiene tres funciones de membresía. Las funciones de membresía definidas para las variables de entrada se definieron *triangulares* y las funciones

de membresía para las variables de salida fueron consideradas *gaussianas*. En este artículo se describe el diseño del sistema de control orientado a tareas. La arquitectura del sistema de control en esta aplicación, del tipo IMA [1], tiene dos jerarquías según el estado del sistema.

2. ALGUNOS FUNDAMENTOS

2.1 MODELOS DIFUSOS DE TAKAGI Y SUGENO

El sistema de control difuso utilizado para la estrategia de evasión de obstáculos del robot tiene soporte en los modelos difusos de Takagi Y Sugeno. Estos modelos se caracterizan por relaciones basadas en reglas difusas, donde las premisas de cada regla representan subespacios difusos y las consecuencias son una relación lineal de entrada-salida (Takagi y Sugeno, 1995). Las variables de entrada en las premisas de cada regla son relacionadas por operadores "y" y la variable de salida es función de las variables de estado, en general, una función lineal. Por lo tanto, las reglas del modelo tienen la siguiente forma:

$$R_i : \text{Si } X_1 \text{ es } A_{1i} \text{ y } \dots \text{ y } X_k \text{ es } A_{ki} \text{ entonces } Y_i = (f_i(X_1, \dots, X_k))$$

donde X_1, \dots, X_k son las variables de entrada o premisas de las reglas, A_{1i}, \dots, A_{ki} son los conjuntos difusos asociados a las variables de entrada, p_0^i, \dots, p_k^i son los parámetros de la regla i y Y_i es la salida de la regla i . f_i es una función que generalmente es lineal, es decir:

$$Y_i = p_0^i + p_1^i X_1 + \dots + p_k^i X_k$$

Por lo tanto, la salida del modelo, Y , se obtiene ponderando la salida de cada regla por su respectivo grado de cumplimiento W_i , es decir:

donde M es el número de reglas del modelo y W_i corresponde al grado de "activación" de la regla i , que se define como:

donde "op" es el operador mínimo o el producto, y es el grado de pertenencia de la variable de entrada X_m al conjunto difuso para $m = 1, \dots, k$.

También los modelos dinámicos de Takagi y Sugeno se pueden representar en variables de estado, es decir:

$$R_i: \text{Si } x_1(t) \text{ es } A_{1i} \text{ y } \dots \text{ y } x_n(t) \text{ es } A_{ni}$$

$$\text{entonces } x(t+1) = A x(t) + B u(t) + d$$

donde $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]$ es el vector de variables de estado del sistema, $u(t) = [u_1(t), \dots, u_m(t)]$ es el vector de entradas del sistema, $c(t) = [c_1(t), \dots, c_n(t)]$ es el vector de condiciones iniciales y A, B, C, D son las matrices de los modelos lineales en variables de estado de las consecuencias.

Es de anotar que es conveniente definir con precisión, que tipo de funciones pueden utilizarse para definir subconjuntos difusos del conjunto de cada variable de estado y para establecer las relaciones entrada-salida para modelos Takagi Sugeno. Para esto es conveniente establecer en detalle las características y propiedades de los conjuntos de cada variable de estado, como dimensión, estructuras topológicas, etc y algunas exigencias prácticas que se traduzcan en propiedades de las funciones mencionadas, tales como linealidad, continuidad, monotonicidad, etc.

2.2 ENFOQUES BASADOS EN COMPORTAMIENTO

Una arquitectura de control basada en comportamientos determina la configuración del sistema de control priorizando unas tareas sobre otras. Puede ser vista horizontalmente por ejemplo, en el caso en el cual cada {it comportamiento} tiene acceso completo a todas las entradas del sistema y procesa su propia acción para controlar el sistema. La acción de control final depende de la prioridad de cada comportamiento.

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1 CONTROLADOR DIFUSO

El diseño del controlador difuso inicia con el modelamiento del sistema, posteriormente con la construcción de las reglas de control y finalmente con el desarrollo de la etapa de defusificación.

3.2.1 MODELAMIENTO DEL SISTEMA

◆ VARIABLES DE ENTRADA.

Después del proceso de montaje de los sensores ultrasónicos, se analizan las características y el comportamiento del sistema en pruebas de laboratorio. Se somete el sistema a la detección de obstáculos a distancias conocidas y se observan las respuestas de los sensores. De forma similar se procede con obstáculos en movimiento. De los resultados obtenidos en esta etapa, se plantearon para cada una de las variables de entrada (ubicación y cercanía de los obstáculos), tres funciones de membresía triangulares dadas por

donde x es la variable de entrada y los tres parámetros a, b, c y d , con

◆ VARIABLES DE SALIDA

Como resultado del análisis del comportamiento del robot en la labor de evasión de obstáculos, se construyeron las funciones de membresía gaussianas para las variables de salida (velocidad de tracción y posición angular del motor de dirección). Estas funciones están dadas por

donde x es la variable de entrada y los tres parámetros a, b, c y d , con

3.1.2 REGLAS DE CONTROL

Una vez modelado el sistema se establecen las reglas difusas de control para el sistema de navegación del robot. Las reglas correspondientes a obstáculos estáticos son las siguientes:

- **GIRO ACUSADO A DERECHA Y BAJA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-izquierda del robot y está "cerca" del robot.
- **GIRO ACUSADO A IZQUIERDA Y BAJA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-derecha del robot y está "cerca" del robot.

- **GIRO LEVE A DERECHA Y MEDIA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-izquierda del robot y está a una distancia "media" del robot.
- **GIRO LEVE A IZQUIERDA Y MEDIA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-derecha del robot y está a una distancia "media" del robot.
- **GIRO LEVE A DERECHA Y ALTA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-izquierda del robot y está "lejos" del robot.
- **GIRO LEVE A IZQUIERDA Y ALTA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-derecha del robot y está "lejos" del robot.

Las reglas correspondientes a obstáculos en movimiento son las siguientes:

- **GIRO ACUSADO A DERECHA Y BAJA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-izquierda del robot y está "cerca" del robot.
- **GIRO ACUSADO A IZQUIERDA Y BAJA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-derecha del robot y está "cerca" del robot.
- **GIRO LEVE A DERECHA Y BAJA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-izquierda del robot y está a una distancia "media" del robot.
- **GIRO LEVE A IZQUIERDA Y BAJA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-derecha del robot y está a una distancia "media" del robot.
- **GIRO LEVE A DERECHA Y MEDIA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-izquierda del robot y está "lejos" del robot.
- **GIRO LEVE A IZQUIERDA Y MEDIA VELOCIDAD:** Si el obstáculo se localiza en la parte frontal-derecha del robot y está "lejos" del robot.

3.1.3 DEFUSIFICACIÓN

En esta etapa se realiza el proceso de defusificación para las variables de salida, utilizando en método de los centroides.

El resultado final de las reglas de control se establece utilizando el operador *min* aplicado a los resultados parciales de cada una de las reglas.

La salida final y_k , con $k = 1,2$ está dada por

3.2 DISEÑO BASADO EN COMPORTAMIENTO

Aquí, la tarea con más alta prioridad corresponde al comportamiento llamado {it comportamiento de emergencia}.

3.2.1 COMPORTAMIENTO DE EMERGENCIA

De este comportamiento depende la seguridad e integridad del robot. Para esto se establece una distancia de seguridad entre los obstáculos fijos y el robot fijada en $3cm$ y entre los obstáculos móviles y el robot, fijada en $10cm$. Si los sensores ultrasónicos detectan un obstáculo a una distancia inferior a la de seguridad, el robot se detiene. La detención del robot también es causada si los sensores detectan un obstáculo en movimiento a una distancia inferior a $10cm$. En una fase posterior del proyecto se realizará el diseño de un *sistema de escape* mediante el cual el robot se mueva en sentido opuesto al de obstáculos en movimiento.

3.2.2 COMPORTAMIENTO DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

En este comportamiento el robot opera con el sistema de control difuso descrito en la sección 3.1.2. Sin embargo, si el obstáculo está a una distancia inferior a los límites de seguridad establecidos por el comportamiento de emergencia, el robot ignorará este comportamiento.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta primera fase del proyecto evidencian el buen desempeño del sistema de control difuso de navegación del robot. Esta estrategia de control, permite trabajar fácilmente con sistemas de múltiples variables de entrada y salida, los cuales generarían un modelo de bastante complejidad al ser tratados mediante técnicas de control clásico.

Al analizar el comportamiento del sistema y de los sensores ultrasónicos, se pudo observar que se presentan no linealidades que mediante las técnicas de control difuso pueden ser manejadas con relativa facilidad.

Al no disponer de herramientas fundamentales del control clásico, como una teoría general de estabilidad, se crea la necesidad de desarrollar teorías equivalentes, propias del control difuso, o de generar un "puente" teóricamente sólido que permita extenderlas. Ya se está trabajando en este campo, como parte del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. R. T. Pack, IMA: The Intelligent Machine Architecture, Ph.d. thesis, Electrical and Computer Engineering, Vanderbilt University. Nashville, TN, Mayo 1998.

2. J. Borenstein and Y. Koren, "Obstacle avoidance with ultrasonic sensors", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, No. 2, April 1988.

3. D.M. Wilkes, A. Alford, FL T. Pack, T. Rogers, R. A. Peters II, and K. Kawamura, "Toward socially intelligent service robots", *International Journal of Applied Artificial Intelligence*, vol. 12, pp. 729-766, 1988.

4. Baxter, J. W. and Bumby, J. R. Fuzzy control of a mobile robotic vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 209, pp. 79-91, 1985.

5. Kaminka, G. A. Real-World Robot Navigation Using Fuzzy Reaction and Deliberation. Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Applications (Fuzzy-97), pp. 331-337. Zichron-Yaakov, Israel. 1997.