

Control adaptativo para navegación de una silla de ruedas inteligente empleando lógica difusa tipo 1 y tipo 2

Mario Rojas, Pedro Ponce, Arturo Molina

Escuela de Ingeniería y Ciencias,
Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México,
México D.F., México

{mario.rojas,pedro.ponce,armolinagtz}@itesm.mx
<http://www.itesm.mx/>

Resumen. En este artículo se presentan dos alternativas para el control de navegación de una silla de ruedas eléctrica en condiciones de espacio reducido. Como primera opción, se propone una estructura empleando lógica difusa con universo de discurso ajustable. Dependiendo de la distancia promedio registrada por tres sensores ultrasónicos, se modifican los parámetros de los conjuntos difusos para expandirlos o contraerlos. Posteriormente, con los datos del ajuste máximo y mínimo de los conjuntos obtenidos, se definieron funciones difusas tipo 2 y se implementó un controlador de lógica difusa tipo 2. Las trayectorias obtenidas en las pruebas realizadas para ambas versiones muestran ventajas en la adaptabilidad al espacio disponible en el escenario de navegación.

Palabras clave: lógica difusa, tipo 2, sensores ultrasónicos, adaptativo, silla de ruedas.

1. Introducción

Los modelos comerciales de sillas de ruedas incluyen un joystick para manipularlas, pero existen pacientes que encuentran difícil utilizar esta interfaz debido a impedimentos físicos o cognitivos [1]. En muchas instituciones se han desarrollado prototipos de “sillas de ruedas inteligentes” que utilizan tecnología para auxiliar a las personas con discapacidad en tareas como evasión automática de obstáculos, navegación autónoma e interacción inteligente con el usuario [2,3]. En [4] se menciona que una “silla de ruedas inteligente” incorpora distintos sensores, software de control, interfaces de usuario, algoritmos de inteligencia artificial, computadoras o procesadores, así como algoritmos de navegación y planeación de trayectorias.

Dentro de los prototipos existen “sistemas semi-autónomos” que trabajan en colaboración con el usuario, el cual planea la trayectoria al destino y va guiando a la silla de ruedas con instrucciones sencillas por medio de alguna interfaz. El controlador se encarga de garantizar la seguridad del paciente durante el trayecto

a su objetivo. Se ha demostrado en distintos trabajos [5,6] que una técnica de control adecuada para los prototipos semi-autónomos es la lógica difusa o “borrosa”. Los conjuntos difusos fueron presentados por Zadeh en [7], dando pie al desarrollo de los sistemas difusos que son ampliamente usados como una técnica para tratar problemas de control donde no se tiene un modelo matemático y la toma de decisiones con información imprecisa.

Por otro lado, en muchos de los prototipos recientes de sillas de ruedas inteligentes es común encontrar la combinación de controladores difusos y sensores ultrasónicos [8,9,10,11,12,13,14,15]. El sensor ultrasónico detecta objetos en el camino y determina a que distancia se encuentran de la silla. Su principio de operación esta basado en el tiempo que tarda en regresar un eco emitido que fue reflejado por alguna superficie. No es raro que sean una alternativa ampliamente usada, ya que su costo es bajo y ofrecen una buena resolución.

Los usuarios de una sillas de ruedas (inteligente o no) desean poder desplazarse con toda confianza en cualquier lugar y que la silla se adapte a las condiciones de espacio. Este problema se puede atacar si se definen correctamente los conjuntos difusos del controlador, pero no es muy práctico estar cambiando los parámetros constantemente y en cada cambio de condiciones. Para resolver esta situación, en [16,17] se describe el principio de universo de discurso ajustable, el cual usa factores de escalamiento para ajustar las funciones de pertenencia y demuestra que este procedimiento tuvo una gran influencia en el desempeño del controlador difuso.

Utilizando la técnica del universo de discurso variable se implementó un controlador difuso adaptativo para la navegación de una silla de ruedas. Se instalaron tres sensores ultrasónicos en una silla de ruedas eléctrica de uso comercial, cuyos datos se usaron para programar reglas de evasión de obstáculos que modifican la velocidad y dirección del movimiento. Las funciones de pertenencia del controlador difuso cambian dependiendo del espacio disponible en el escenario. Para modificar esas funciones se utiliza otro control difuso de tipo SISO, el cual determina que tanto se tienen que expandir o contraer los conjuntos difusos del control de navegación.

También se exploró la alternativa de conjuntos difusos tipo 2 (T2) para modificar los parámetros de las funciones de pertenencia. Con los valores de los conjuntos ajustados por el controlador SISO, se definieron los límites superior e inferior de funciones difusas T2. Los conjuntos difusos T2 fueron presentados por Zadeh en [18], pero Karnik extendió la idea a sistemas difusos [19]. Usando estos sistemas, se busca definir la incertidumbre del espacio de navegación en las funciones T2.

Se hicieron pruebas de navegación con las implementaciones del controlador tipo 1 (T1) y T2 y se tomaron datos de las trayectorias descritas para establecer las características de cada versión. Los resultados muestran ventajas en la navegación debido a las metodologías de ajuste que se implementaron.

2. Metodología

2.1. Lógica difusa tipo 1 y tipo 2

La lógica difusa tipo 1 (T1) es una técnica desarrollada por el profesor Zadeh en la Universidad de Berkley, la cual amplía la teoría tradicional de inclusión o exclusión absoluta de un elemento en un conjunto. En la lógica difusa se considera que un elemento x pertenece a un conjunto A en cierto grado de inclusión, y este grado es descrito por una función de pertenencia designada como $\mu_A(x)$.

La estructura básica de un controlador difuso T1 se presenta en la figura 1a. Se puede ver en el diagrama de bloques que la información “nítida.” en las entradas del sistema se “fuzzifica.” en grados de pertenencia, usando variables lingüísticas y funciones pertenencia que toman valores entre 0 y 1. Estas variables lingüísticas será útiles para construir la base de reglas obtenidas de la experiencia de un ser humano. Las variables difusas de entrada serán los antecedentes y las de salida las consecuencias de las reglas. Los valores de las variables se relacionan con un método de inferencia que determina el valor de peso de la regla (*fire strenght*). Finalmente, este valor de peso se “defuzzifica” para obtener el valor “nítido” de la salida o salidas.

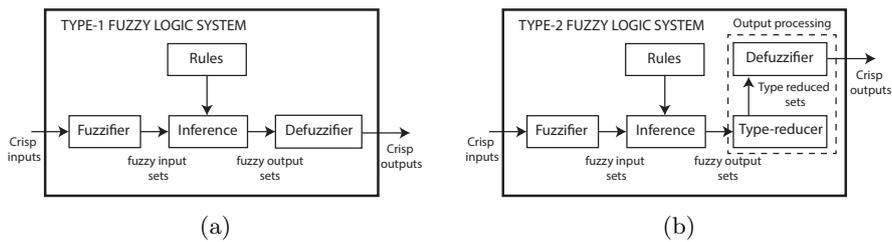


Fig. 1: Estructura de controladores difusos (a) tipo 1 (b) tipo 2.

Por otro lado, la lógica difusa T2 es una forma de lidiar con las incertidumbres que existen en el sistema [20]. Las incertidumbres se pueden expresar como “las palabras que tiene diferentes significados para cada persona”. De este modo, los conjuntos difusos T2 se pueden ver como una colección de distintas opiniones sobre una variable lingüística. Un conjunto difuso T2 se designa como \tilde{A} y su función de pertenencia es $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, donde $x \in X$ y $u \in J_x \subseteq [0, 1]$. J_x se conoce como la función de pertenencia primaria de x , y para representar la incertidumbre de J_x , se define una función de pertenencia secundaria $\mu_{\tilde{A}}(x, u) \in [0, 1]$. Se conoce como un conjunto Intervalo cuando la función de pertenencia secundaria $f_x(u) = 1, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]$. La función Intervalo T2 (I-T2) es una simplificación de la forma general que permite hacer una implementación computacional de sistemas difusos T2, ya que su costo es mucho menor que el de la forma general. Aún así, los sistemas basados en conjuntos I-T2 son más complejos que aquellos basados T1.

En [21] se mencionan algunas aplicaciones industriales de la lógica difusa T2 y en [22] se habla de una creciente tendencia de publicaciones usando esta técnica. En la figura 1b se presenta la estructura de un controlador difuso T2. Observe que es muy parecida a la estructura del T1 presentado en la figura 1a, pero las reglas están basadas en funciones de I-T2 y se incluye otro bloque llamado “reducción de tipo”, que reduce la salida a una función T1 para su defuzzificación.

La incertidumbre de una función de pertenencia \tilde{A} es una región llamada “huella de incertidumbre” (*footprint of uncertainty* o FOU). La FOU es la unión de todas las funciones de pertenencia primarias, y está delimitada por las funciones de pertenencia superior (*upper membership function* o UMF) e inferior (*lower membership function* o LMF), designadas como $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ y $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, respectivamente. Un esquema general de la FOU se muestra en la figura 2.

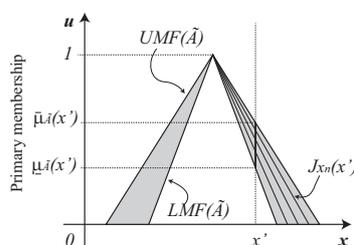


Fig. 2: La huella de incertidumbre.

Cambiar la estructura del controlador difuso de T1 a T2 no garantiza mejoras en su desempeño, pues es necesario entender cuáles son los efectos de la huella de incertidumbre. Con ayuda de la FOU se puede modificar algunas características de la respuesta del sistema, sin embargo, es necesario diseñarla cuidadosamente.

2.2. La silla de ruedas

Se adaptó una silla de ruedas eléctrica de la marca Quickie modelo P222-SE con el hardware mostrado en la figura 3. Se instalaron sensores ultrasónicos en los extremos derecho ($S1$) e izquierdo ($S2$), así como al frente en el centro ($S4$). Un microcontrolador reúne la información de distancia registrada por los sensores ultrasónicos (en centímetros) para mandarla a una computadora con LabVIEW, plataforma en la cual se programaron los controladores difusos. Así mismo, se usa un módulo NI-DAQ 6211 para proporcionar las señales de control a los motores de la silla de ruedas.

2.3. El controlador de navegación T1

El objetivo de la silla es avanzar siempre hacia adelante, pero cuando algún sensor detecta un objeto se deben modificar la velocidad y la dirección para eva-



Fig. 3: Los componentes del sistema.

dirlo. Las reglas del controlador se plantearon de acuerdo a los objetos detectados en el camino de la silla de ruedas y la distancia a la que se encuentran.

Para las tres variables de entrada de distancia $S1$, $S2$ y $S4$ se definieron los conjuntos trapezoidales C (“Close”) y F (“Far”), mostrados en las figuras 4a y 4b. Por otro lado, se definieron varios conjuntos para las salidas M (“Movement”) y D (“Direction”), que corresponden a los dos canales de voltaje analógico que permiten que la silla avance o gire. Para M se definieron los tres conjuntos difusos N (“Null”), SF (“Small-Forward”) y F (“Forward”); mientras que para D se usaron L (“Left”), SL (“Small-Left”), N (“Null”), SR (“Small-Right”) y R (“Right”). Las variables de salida se representaron con conjuntos triangulares y trapezoidales y se presentan en las figuras 4c y 4d.

Los conjuntos de salida se encuentran distribuidos dentro del rango de 4 a 8 volts, donde 5.8 representa el estado de reposo. En el caso de M , un aumento de voltaje representa movimiento de la silla hacia adelante, mientras que un descenso provoca movimiento hacia atrás. Similarmente con D , un incremento en el voltaje de 5.8 hace que la silla gire a la derecha, mientras que un decremento provoca que gire a la izquierda. La velocidad de movimiento es proporcional a cambio del voltaje de reposo.

Con las variables lingüísticas y los conjuntos definidos se plantearon las 8 reglas mostradas en la tabla 1 para el control de navegación. Por convención se definió que la silla gire a la derecha en caso de detectar un obstáculo que bloquea el sensor central (regla 7).

2.4. El controlador adaptativo T1

Con el fin de estimar el espacio disponible en el escenario de navegación se calcula el promedio de las distancias registradas por los sensores ultrasónicos. En trayectorias libres de obstáculos los conjuntos se expanden a su rango máximo.

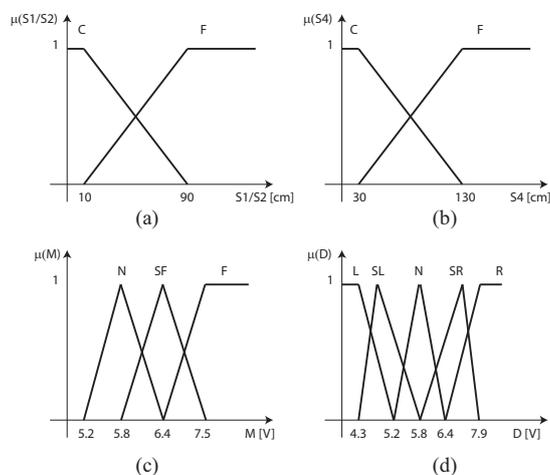


Fig. 4: Definición de los conjuntos difusos. (a) Entradas $S1/S2$ (b) Entrada $S4$ (c) Salida M (d) Salida D .

Tabla 1: Rules for the fuzzy controller with distance inputs

Number	Rules
1	$S1 : C \sqcup S2 : C \sqcup S4 : C \Rightarrow M : N \sqcup D : N$
2	$S1 : C \sqcup S2 : C \sqcup S4 : F \Rightarrow M : MF \sqcup D : N$
3	$S1 : C \sqcup S2 : F \sqcup S4 : C \Rightarrow M : N \sqcup D : L$
4	$S1 : C \sqcup S2 : F \sqcup S4 : F \Rightarrow M : MF \sqcup D : ML$
5	$S1 : F \sqcup S2 : C \sqcup S4 : C \Rightarrow M : N \sqcup D : R$
6	$S1 : F \sqcup S2 : C \sqcup S4 : F \Rightarrow M : MF \sqcup D : MR$
7	$S1 : F \sqcup S2 : F \sqcup S4 : C \Rightarrow M : N \sqcup D : R$
8	$S1 : F \sqcup S2 : F \sqcup S4 : F \Rightarrow M : F \sqcup D : N$

Por el contrario, al aparecer objetos en el camino de la silla el valor promedio disminuye y los conjuntos se estrechan. En la figura 5 se muestra el comportamiento de los conjuntos para las variables $S1/S2$, en sus casos de ajuste mínimo y máximo.

Para calcular el tamaño del universo de discurso se implementó un sistema difuso de tipo SISO (Single-input, Single-Output), que usa la variable de entrada "Spacez la variable de salida "Scale". El factor de escalamiento permite ajustar los parámetros que definen las funciones de pertenencia de acuerdo al espacio disponible. Las reglas de ajuste son las siguientes:

- R1: IF 'space' IS 'small' THEN 'scale' IS 'reduced'
 R2: IF 'space' IS 'large' THEN 'scale' IS 'expanded'

En la figura 6a se muestra el diagrama de bloques para el control de navegación sin el ajuste de parámetros, y en figura 6b se presenta el control de

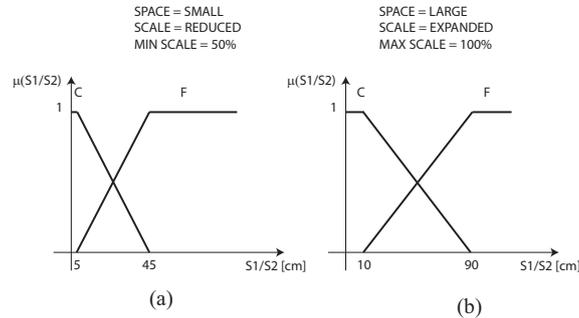


Fig. 5: Límites de escalamiento para los conjuntos de entrada de las variables $S1/S2$. (a) Conjunto reducido (b) Conjunto expandido

navegación junto con el bloque de ajuste SISO y el bloque para calcular el promedio de las distancias de entrada.

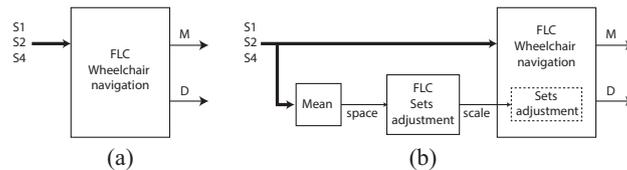


Fig. 6: Diagrama de bloques de controladores. a) Controlador difuso de navegación b) Controlador difuso con universo del discurso ajustable.

2.5. El controlador T2

Con los conjuntos ajustados al universo de discurso mínimo y máximo de la figura 5, se definieron los conjuntos difusos T2. Con ello, los límites para navegar en espacios estrechos y en espacio abiertos se incluyen dentro de la misma función; como consecuencia, la versión con lógica difusa T2 para el controlador ajustable no necesita el bloque SISO descrito para el sistema de T1. Los conjuntos del control T2 se muestran en la figura 7. Solamente se definieron las entradas difusas T2, ya que el tamaño de la huella de incertidumbre para las salidas es muy pequeño y no causa efecto debido a la mecánica de la silla de ruedas. Observe que las huellas de incertidumbre no son simétricas.

3. Pruebas y resultados

Las pruebas experimentales del prototipo se realizaron en los escenarios mostrados en la figura 8. El primero es un pasillo de espacio regular, mientras que

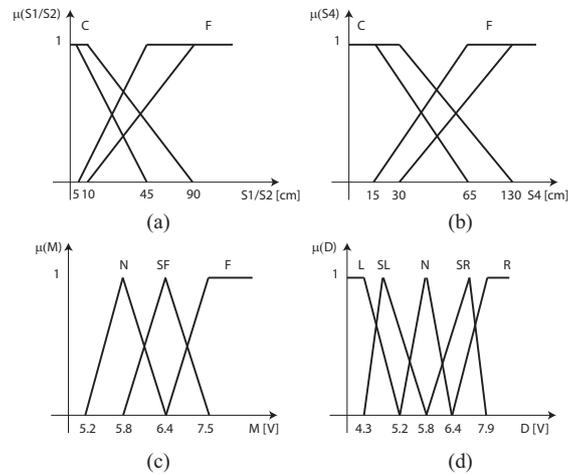


Fig. 7: Definición de conjuntos difusos tipo 2 para el controlador ajustable.

en el segundo las medidas se van estrechando gradualmente. Estos escenarios se crearon usando bloques de un material suave para evitar daños en caso de existir algún choque con los muros. La silla de ruedas debe navegar a través de los escenarios operada primero por el control de navegación T1, luego por el control adaptativo T1 y al final por el control T2. Su velocidad se fijó en 4 m/seg, aproximadamente. Las trayectorias descritas fueron registradas en video y marcadas con puntos mediante el software *VideoPoint Physics Fundamental*.

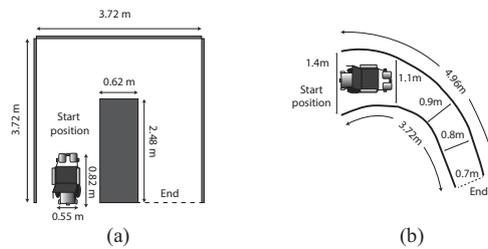


Fig. 8: Escenarios experimentales. (a) Trayectoria con espacio regular (b) Trayectoria con espacio variable

3.1. Trayectoria de espacio regular

Para el caso del escenario 8a se realizaron dos conjuntos de pruebas: primero libre y después con pequeños obstáculos que modifican las condiciones del trayecto. En los resultados mostrados en la figura 9 se observa que las trayectorias

de los casos (a) y (b) son muy parecidas; no así el resultado para el T2 donde la silla se mantuvo más cerca de los muros. Similarmente los casos (d) y (e) son parecidos, pero (f) es distinto.

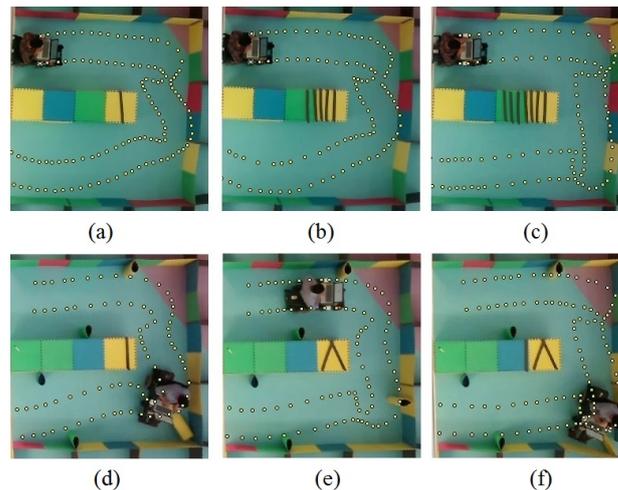


Fig. 9: Trayectorias obtenidas en la prueba con obstáculos y sin obstáculos. a) Controlador de navegación T1. b) Controlador ajustable T1. c) Controlador T2. d) Controlador de navegación T1. e) Controlador ajustable T1. f) Controlador T2.

Usando los datos de $S2$ se calculó la distancia promedio de la silla al muro por el lado izquierdo. También se midieron los tiempos de recorrido en segundos y se registraron los choques que tuvo el prototipo. Los datos encontrados para las pruebas con obstáculos y sin obstáculos se resumen en la tabla 2.

Para la prueba sin obstáculos se puede ver que el controlador T2 mantuvo una distancia promedio de 38.94 cm, la cual es menor que la de los otros controladores y coincide con lo observado en la figura 9. El tiempo del trayecto es mayor para el control T2 y no se registraron choques para ninguna prueba de los controles T1, pero si del T2.

Por otro lado, en la prueba con obstáculos el control T2 mantuvo una distancia promedio de 39.54 cm, menor que las de los controladores T1. También el tiempo de recorrido fue mayor para el control T2. Finalmente, el control de navegación T1 y el control T2 registraron un choque con el tercer objeto que apareció en el camino, pero el control adaptativo T1 lo libra bien.

3.2. Trayectoria de espacio variable

Observe que el escenario mostrado en la figura 8b es una curva donde el tamaño del pasillo que se forma se va estrechando. Bajo estas condiciones se probó

Tabla 2: Datos registrados para las pruebas realizadas.

Control	dist.(cm)	tiempo(seg)	choques	*dist.(cm)	*tiempo(seg)	*choques
Navegación	47.83	11.78	no	45.68	11.72	si
Adaptativo	48.58	11.5	no	47.26	12.74	no
Tipo 2	38.94	13.3	si	39.54	13.02	si

*Prueba con obstáculos

la adaptabilidad del sistema; primero con el control de navegación T1, luego el control adaptativo T2 y finalmente el control T2. Las trayectorias obtenidas se presentan en la figura 10, donde se puede ver que el controlador adaptativo T1 (figura 10b) describió una trayectoria sin oscilaciones y sin choques, a diferencia de los otros dos casos. El control de navegación T1 ocupó 13.56 segundos para terminar el recorrido, el control ajustable T1 ocupó 15.01 segundos y el T2 en 12.76 segundos.

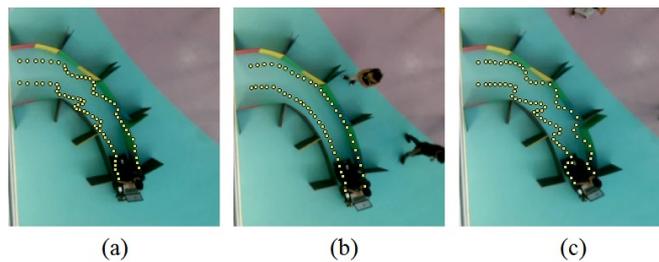


Fig.10: Trayectorias en pasillo estrecho. a) Controlador de navegación T1. b) Controlador ajustable T1. c) Controlador T2.

4. Discusión

4.1. Desempeño

De acuerdo a las pruebas realizadas y con datos obtenidos, se resumen las características de los controladores adaptativos T1 y T2 en la tabla 3. En primer lugar se destaca la estructura usada, ya que a consecuencia de ello, el controlador T1 tiene un tiempo de respuesta menor que el T2. Los bloques de la implementación del sistema de control difuso T2 (ver fig. 1b) hacen que sea mas lenta su ejecución. El tiempo de ejecución del controlador adaptativo T1 consume 1.02 ms y el de T2 consume 6.85 ms.

Para las prueba del pasillo con espacio regular, el controlador T2 se mantuvo siempre más cerca del muro que cualquiera de las versiones T1. Esta característica puede ser útil si se desea que la silla de ruedas siga el contorno de paredes.

El tiempo de recorrido del control T2 siempre fue más grande, pero es razonable si se considera que una trayectoria más cercana al muro exterior representa una distancia ligeramente mayor. Por otro lado, el controlador ajustable T1 no describió una trayectoria muy diferente a la del control de navegación T1 por lo cual no se ven resultados del ajuste de funciones. Sin embargo, en las pruebas donde el espacio del pasillo se reduce gradualmente el control ajustable T1 se adapta muy bien, a diferencia del control T2 que presenta muchas oscilaciones y choques con los muros. En este caso el controlador ajustable es muy superior.

En la práctica, el proceso de ajuste es más simple en el control adaptativo, ya que solo se tienen que cambiar los parámetros de las variables “spacez “scale”. Por otro lado, para ajustar el control tipo 2 se deben modificar las definiciones de las huellas de incertidumbre cambiando los parámetros de las UMF y LMF para las tres variables de distancia.

4.2. Limitaciones

Las condiciones de las pruebas con la silla están sujetas al ambiente controlado del laboratorio. No se consideran otras variables que influyen en la trayectoria descrita por el sistema tales como el tipo de superficie donde se desplaza la silla o su velocidad, tampoco las variaciones en los sensores que pueden ser ocasionadas por los cambios en los ángulos de incidencia de las señales o las propiedades de las superficies de reflexión, ni los cambios de peso en el usuario de la silla.

Por otra parte, la prueba con obstáculos permitió observar colisiones con el tercer objeto de la trayectoria. Este inconveniente se observó con el controlador de navegación sin ajuste y el de T2. Sin embargo, el T1 adaptativo logró evadir bien ese obstáculo. Es importante señalar esta diferencia, ya que se ha observado que el controlador de navegación y el de conjuntos ajustables describen una trayectoria similar, pero éste último demostró ser superior en esta prueba. Las colisiones que se tuvieron en las pruebas indican una debilidad del método de ajuste, sin embargo, muchas serán inevitables en aquellos espacios muy reducidos. Para este caso, se debe asegurar que sean de baja intensidad con el fin de que no puedan dañar al paciente o a la silla de ruedas. Así mismo, se debe contar con otros sensores o sistemas que garanticen mayor seguridad para el sistema.

Tabla 3: Comparativa de algunos aspectos de los controladores adaptativos

Características	Control T1	Control T2
Diseño e implementación	2 controladores difusos	Sistema tipo 2
Tiempo de respuesta	1.02 ms	6.85 ms
Respuesta en espacios reducidos	Se adaptó a las condiciones	Navegó más cerca de los muros
Colisiones con muros	No	Si
Colisiones con obstáculos	No	Si
Ajuste de parámetros	Cálculo automático	Con LMF y UMF

4.3. Trabajo futuro

Se puede aplicar la metodología de los sistemas de control con algún dispositivo de alta velocidad. Sin embargo, el funcionamiento dependerá en gran medida de la velocidad de respuesta de los sensores. No se descarta que este sistema pueda funcionar de mejor manera en un FPGA o un procesador dedicado.

Así mismo, es necesario realizar análisis estadísticos que arrojen más información para comparar el rendimiento de las diferentes implementaciones. Los datos estadísticos pueden ayudar a encontrar características que no se aprecian simplemente con las trayectorias.

Finalmente, sería importante realizar pruebas con pacientes que padezcan alguna discapacidad, ya que hasta el momento se han hecho pruebas con personas que no son usuarios de silla de ruedas.

5. Conclusiones

Se presentaron dos alternativas de controladores difusos que permiten a una silla de ruedas eléctrica navegar y adaptarse a las condiciones de espacio reducido en el escenario. La primera versión fue implementada usando una estructura de universo de discurso variable, cuyo ajuste se realiza por medio de reglas difusas. La segunda alternativa fue el uso de lógica difusa T2, donde la huella de incertidumbre permite incluir los rangos de ajustes mínimo y máximo en la función de pertenencia de manera simultánea. Después de hacer pruebas de validación para las versiones de los controladores implementados, se observó que el control con funciones T2 mantiene a la silla más cerca de los muros del laberinto pero el control ajustable T1 funciona mejor en condiciones donde el espacio se va haciendo estrecho.

Los sistemas T2 se han usado ampliamente y con buenos resultados, pero es muy importante estudiar cuáles son los efectos de la huella de incertidumbre en el sistema para que se comporte adecuadamente. Por otro lado, el controlador de ajuste es muy sencillo y puede ser reemplazable por alguna función lineal de escalamiento, sin embargo, no se descarta que se puedan incluir más reglas para mejorar la función de adaptabilidad.

Agradecimientos Este trabajo fue realizado con el apoyo del Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México y el CONACYT.

Referencias

1. Simpson, R.C., LoPresti, E.F., Cooper, R.A.: How many people would benefit from a smart wheelchair? *J. Rehabil. Res. Dev.*, 45, 53–71 (2008)
2. Krishnan, R.H., Pugazhenti, S.: Mobility assistive devices and self-transfer robotic systems for elderly, a review. *Intel Serv Robotics*, 7, 37–49, doi:10.1007/s11370-013-0142-6 (2014)

3. Simpson, R.C.: Smart wheelchairs: A literature review. *J Rehabil Res Dev.*, 42, 423–436 (2005)
4. Urdiales, C.: Collaborative Assistive Robot for Mobility Enhancement (CARMEN) - The bare necessities: assisted. Intelligent Systems Reference Library, Springer, Berlin (2012)
5. Wang, Y., Wang, S.: Identification of directional intention for a wheelchair robot using a distance fuzzy reasoning algorithm. In: 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS), pp. 260–263, doi:10.1109/ICAMEchS.2014.6911661 (2014)
6. Wu, B.-F., Jen, C.-L., Tsou, T.-Y., Li, W.-F., Tseng, P.-Y.: Accompanist detection and following for wheelchair robots with fuzzy controller. In: 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS), pp. 638–643 (2012)
7. Zadeh, L.A.: Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353, doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X (1965)
8. Klabi, I., Masmoudi, M.S., Masmoudi, M.: Advanced user interfaces for intelligent wheelchair system. In: 2014 1st International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), pp. 130–136. doi:10.1109/ATSIP.2014.6834592 (2014)
9. Bayar, V., Akar, B., Yayan, U., Yavuz, H.S., Yazici, A.: Fuzzy logic based design of classical behaviors for mobile robots in ROS middleware. In: 2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) Proceedings, pp. 162–169, doi:10.1109/INISTA.2014.6873613 (2014)
10. Zal, F., Chen, T.-S., Chi, S.-W., Kuo, C.-H.: Fuzzy controller based subsumption behavior architecture for autonomous robotic wheelchair. In: 2013 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS), pp. 158–163, doi:10.1109/ARIS.2013.6573552 (2013)
11. Tyagi, V., Gupta, N.K., Tyagi, P.K.: Smart wheelchair using fuzzy inference system. In: 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS), pp. 175–180 doi:10.1109/GHTC-SAS.2013.6629911 (2013)
12. Cardoso Bissoli, A.L., de Lima, L.E.M., Ardizzon Lovatte, M.: Automatic path generation and reactive behavior for a wheel chair. In: 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 525–532, doi:10.1109/ICMA.2013.6617972 (2013)
13. Moslehi, H.R., Gu, J.: Design and development of fuzzy logic operated smart motorized wheelchair. In: 2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), pp. 869–873, doi:10.1109/CCECE.2011.6030581 (2011)
14. Liu, G., Yao, M., Zhang, L., Zhang, C.: Fuzzy Controller for Obstacle Avoidance in Electric Wheelchair with Ultrasonic Sensors. In: 2011 International Symposium on Computer Science and Society (ISCCS), pp. 71–74, doi:10.1109/ISCCS.2011.27 (2011)
15. Njah, M., Jallouli, M.: Wheelchair obstacle avoidance based on fuzzy controller and ultrasonic sensors. In: 2013 International Conference on Computer Applications Technology (ICCAT), pp. 1–5, doi:10.1109/ICCAT.2013.6522062 (2013)
16. Wang, Y., Deng, H., Chen, Z.: Adaptive fuzzy logic controller with rule-based changeable universe of discourse for a nonlinear MIMO system. In: 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA '05, pp. 8–13, doi:10.1109/ISDA.2005.18 (2005)
17. Wang, Y.: Adaptive fuzzy logic controller with changeable universe of discourse using neural fuzzy networks. In: Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 893–898, Vol. 2, doi:10.1109/ICMLC.2005.1527070 (2005)

18. Zadeh, L.A.: The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8, 199–249, doi:10.1016/0020-0255(75)90036-5 (1975)
19. Karnik, N.N., Mendel, J.M., Liang, Q.: Type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7, 643–658, doi:10.1109/91.811231 (1999)
20. Mendel, J.M., John, R.I.: Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10, 117–127, doi:10.1109/91.995115 (2002)
21. Dereli, T., Baykasoglu, A., Altun, K., Durmusoglu, A., Türksen, I.B.: Industrial applications of type-2 fuzzy sets and systems: A concise review. *Computers in Industry, Fuzziness in Industry and Applications*, 62, 125–137, doi:10.1016/j.compind.2010.10.006 (2011)
22. Wu, D., Mendel, J.M.: Designing practical interval type-2 fuzzy logic systems made simple. In: *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pp. 800–807, doi:10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891534 (2014)