

Control difuso para la mimetización del movimiento de un prototipo de prótesis de una extremidad canina

Eduardo de Jesús García-Velázquez¹,
Eugenia-Graciela López-Miranda²,
David Tinoco-Varela¹, Raúl-Dalí Cruz-Morales¹

¹ Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Estudios Superiores,
Ingeniería Mecánica Eléctrica
México.

² Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Estudios Superiores,
Lic. en Medicina Veterinaria y Zootecnia,
México

{albeitar, rdcruz}@comunidad.unam.mx,
datival9@hotmail.com, jesus.g.velazquez@gmail.com

Resumen. En este artículo se presenta el desarrollo de un controlador difuso que se pretende sea implementado en una prótesis para un perro mestizo de raza grande, el cual carece del miembro torácico derecho, generando un movimiento inteligente en la prótesis. Este sistema consta de dos partes, una parte es el dispositivo que recaba los datos de movimiento de una pata canina sana y la otra parte que recibe tal información y la procesa para generar un movimiento natural en la pata amputada del can, ambas secciones del sistema propuesto comunicadas por medio de Bluetooth (con la intención de en un futuro integrarlo al IoT). Para el control difuso se recurre al uso de un sensor conocido como acelerómetro, el cual calcula en un tiempo definido de lectura y respuesta los movimientos que realiza el perro en su miembro sano; el comportamiento mimético de las extremidades al caminar permite crear un control que considera tanto la posición como la fuerza de los miembros traseros para formular las reglas que la lógica difusa necesita para replicar este comportamiento, aplicando el Método de Mamdani.

Palabras clave: Prótesis inteligente, lógica difusa, control difuso.

Fuzzy Control for Motion Mimicry of a Canine Limb Prosthesis Prototype

Abstract. This paper presents the development of a fuzzy controller that will be implemented in a prosthesis for a large breed mongrel dog, which lacks the right thoracic limb, generating an intelligent movement in the prosthesis to be

developed. This system consists of two parts, a part that receives the movement data of a healthy canine paw and a part that receives such information and processes it to generate a natural movement in the canine's amputated paw, both sections of the proposed system communicated by Bluetooth medium. For fuzzy control, a sensor known as an accelerometer was used, which will calculate the movements made by the dog in its healthy limb at a defined reading and response time; the mimetic behavior of the limbs when walking will allow us to create a control that takes into consideration both the position and the strength of the hind limbs to formulate the rules that fuzzy logic (by Mamdani's Method).

Keywords: Intelligent prosthetics, fuzzy logic, fuzzy control.

1. Introducción

El aspecto motriz es sumamente importante para la medicina veterinaria y la salud general de un perro, en este aspecto, obviamente, se ven involucradas las cuatro extremidades del can. Siendo que estas pueden sufrir traumatismos superficiales en algún momento por diversas causas, es importante considerar que estos traumatismos pueden provocar en él alguna hemorragia, infección o algún carcinoma que termine en una desafortunada amputación.

La amputación, en términos médicos, es una extirpación de una parte del cuerpo que se encuentre dañada y cuyo daño comprometa la salud general del animal. Los procedimientos más comunes respecto a esta intervención quirúrgica son el corte de la zona afectada y la desarticulación de la región donde el daño se desarrolla. Es decir, se puede cortar de tajo la zona o ubicar la región de la extremidad y extirpar la parte que se encuentre bajo una articulación.

Un perro puede llevar una vida normal con únicamente tres de sus extremidades, o incluso dos y ser tratado con una silla de ruedas que supla en ciertos aspectos el movimiento que sus miembros amputados le otorgaban.

La problemática se presenta cuando el estado de cojera decae en problemas óseos en la extremidad de soporte al intentar caminar o trotar, provocando que su centro de gravedad, sobre la misma columna, cambie abruptamente causando daños en esta parte del cuerpo, parte sumamente delicada. La medicina veterinaria moderna, propone a los dueños como solución el implemento de prótesis mecánicas que suplan la o las extremidades perdidas.

En México las prótesis mecánicas para miembro torácico son escasas pues son pocas las organizaciones que realizan este tipo de prótesis, y aún al día de hoy, con costes entre \$1,350 y 1,750 dólares.

El propósito central del desarrollo presentado en este artículo es la creación de un control difuso que se pueda implementar en un aditamento mecatrónico que proporcione al perro una mejor calidad de vida.

2. Elementos de un sistema de prótesis canino

En la práctica veterinaria existe una denominación para cada parte del cuerpo respecto a la geometría y su relación con los planos cartesianos, lo cual es apreciable

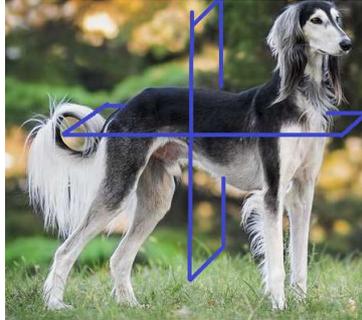


Fig. 1. Planos anatómicos en el perro. Imagen tomada y modificada a partir de <https://pixabay.com/es/photos/naturaleza-perro-greyhound-3047194/>.

en la figura 1; dada la universalidad de esta nomenclatura, nos serviremos de ella para denominar los elementos de un prótesis. La comunión entre términos de ingeniería y veterinaria es importante para futuros desarrollos.

Para el miembro torácico, se consideran los siguientes términos que son utilizados a lo largo del texto en relación con la ubicación de cada elemento. La nomenclatura se basa en la aceptada desde 1968 por la *Nómina Anatómica Veterinaria*: Dorsal: Cualquier entidad que se encuentre más cerca del dorso; Ventral: Cualquier entidad que se encuentre más cercana al vientre; Medial: Entidades cercanas al plano medio o dorsal; Distal: Cualquier entidad que se encuentre en dirección opuesta al plano medial; Proximal: Opuesto al distal, toda entidad que se encuentre en dirección hacia el plano medial.

El miembro torácico, como parte del conjunto que presenta el sistema locomotor en el perro, está dividido en cuatro regiones las cuales poseen huesos y músculos que proporcionan movimientos específicos que actuando en sinergia otorgan el andar característico de estos animales.

Se conoce como biomecánica al estudio de las interacciones entre fuerzas, velocidades y aceleraciones en los organismos vivos. Toda entidad biológica compleja, especialmente los animales, está sujeta a las mismas leyes de la mecánica clásica que los cuerpos inanimados, con la salvedad de que estos son capaces de “producir” fuerzas propias con la que sus elementos locomotores (huesos, articulaciones, músculos) generen desplazamiento.

2.1. Milo: paciente a la espera de su prótesis

Para poder hacer este proyecto realidad se ha encontrado un perro con la triste situación de no contar con su extremidad delantera derecha. Este es el caso de Milo.

Milo en la figura 2 (izquierda) es un perro mestizo adulto de aproximadamente 6 años. En una revisión de rutina con su médico veterinario, los datos anatómicos obtenidos de Milo fueron los siguientes: Masa total: aprox. 30.5 Kg; Altura hasta la cruz: 58 cm; Longitud normal de escápula izquierda: 19 cm; Longitud normal de húmero izquierdo: 23 cm; Longitud normal de ulna izquierda: 14 cm; Longitud normal de extremidad residual derecha: 11 cm.



Fig. 2. Milo, un cachorro con pérdida de miembro torácico delantero. A la derecha, prueba de sensor acelerómetro para comunicar al sistema difuso.

3. Lógica y control difuso

Se conoce a la inteligencia artificial como la capacidad que tiene las máquinas de interpretar e interactuar con el entorno de manera muy similar a como lo haría el ser humano. Estas interacciones se dan a través de dos características fundamentales, las cuales son atribuidas al concepto general de inteligencia: el razonamiento y el aprendizaje.

En un sistema inteligente, la toma de decisiones autónomas basadas en parámetros de entrada puede ser administrada de manera eficiente por la lógica difusa. A continuación, se presenta una explicación breve de los conceptos más generales de esta rama de la I.A. y cómo puede ser utilizado en el presente proyecto.

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y lo verdadero [1]. Fue desarrollada a principios de la segunda mitad del s. XX por el matemático Lofti A. Zadeh [2].

Como es bien sabido, las máquinas poseen un lenguaje, el cual está basado en un sistema de numeración binaria; es decir, solamente acepta estados de niveles bajos o “ceros” y estados de niveles altos o “unos”, sin embargo, para un modelado más realista de un fenómeno físico, se utilizan valores reales entre 0 y 1, evaluación que nos permite realizar la lógica difusa.

Un ejemplo muy simple que se le puede dar a este concepto es el siguiente: “Juanito no gusta de la leche caliente porque le quema la lengua. A Juanito le gusta la leche tibia”.

El concepto que se está manejando en esta frase, la naturaleza de lo que se habla, es la temperatura de una bebida, la leche. Aquí se encuentran dos conceptos bien conocidos por las personas: “caliente” y “tibio”. Un valor dentro de la lógica formal sería 10 °C como una bebida fría y 60 °C como una bebida caliente.

Sin embargo, para una persona que no sea Juanito, 60 °C podría parecerle no tan caliente, o incluso los 10 °C le puede parecer “tibio”. El concepto de “tibio”, de una manera muy burda, se puede decir que se encuentra entre caliente y frío; es decir, si caliente es el máximo (uno) y frío es el mínimo (cero), el concepto de tibio no podría entrar en la lógica formal. Este solamente entraría en el de la lógica difusa como un 0.5, la pertenencia del valor de tibio es del 50% para caliente y 50% para frío.

Explicado esto, entra en el juego un segundo concepto de suma importancia para entender de manera completa la lógica difusa: grado de pertenencia. Este concepto refiere al punto que intersecta el valor de la variable de entrada a un conjunto difuso, es decir, que tanto el dato se encuentra dentro de un conjunto.

3.1. Proceso para la generación de un control difuso

El controlador difuso, se compone de diversas secciones y cada una de ellas realiza un determinado tratamiento a los datos de entrada, para así obtener una conclusión “lógica” en la salida, a continuación, se describen los pasos a seguir:

1. Las características que describan al fenómeno a modelar, se deben interpretar en conjuntos difusos. Estos valores pueden tener un rango tan amplio como se quiera tomando en consideración la distribución de los datos dentro de los mismos,
2. Una vez seleccionada la naturaleza de los datos que se requieren, se procede al proceso de fusificación. Es decir, convertir los elementos de entrada en valores reales entre 1 y 0,
4. El siguiente paso es la asignación de reglas. Esta puede realizarse a través de una matriz de decisiones o reglas, bajo las cuales las entradas interactuarán e impactan a un conjunto difuso de salida,
5. El último punto del proceso es la defusificación. Es decir, convertir los valores difusos del conjunto de salida en valores nítidos o valores capaces de ser interpretados por una máquina. Para ello, existen diferentes métodos, entre ellos el método de Mamdani y el de Sugeno.

Estos sistemas han sido eje principal de desarrollo de una gran cantidad de aplicaciones e interfaces, entre las que se encuentran, el control de señales PWM para mejorar el rendimiento y la eficiencia en unidades de frecuencia variable (VFD) [3]; el control de la estabilización de un sistema de silla de ruedas [4]; control de sistemas de robots con llantas [5]; para el control de sistemas domóticos [6]; y en particular una aplicación interesante para los fines de este proyecto, es el control de diferentes tipos de prótesis [7, 8, 9].

4. Expectativa

A través de la teoría desarrollada por M. Hildebrand sobre la simetría en los patrones de movimiento de los cuadrúpedos, el diseño de control inteligente en un perro de raza grande, el cual carece de su miembro torácico derecho, debe ser capaz de leer de manera inversa los patrones de movimiento de la extremidad delantera izquierda; a través de un control difuso se hace la lectura de todo un universo de datos de los ángulos de ataque sobre la articulación del hombro que es la que presenta un desplazamiento más significativo y marca el ritmo de la marcha.

Este controlador debe ser capaz de accionar un servomecanismo previamente diseñado por las teorías de síntesis de máquinas que emule de manera cercana el

movimiento natural de las extremidades, para otorgar al animal mejor movilidad y extender su calidad de vida.

La teoría de Hildebrand estipula que la marcha en los animales se compone de movimientos repetitivos y simétricos [10] entre cada una de las extremidades desplazándose a una secuencia claramente observable por métodos utilizados en el estudio veterinario.

5. Diseño de un sistema embebido de control electrónico

Para que un sistema embebido se pueda considerar un elemento constitutivo y de control en un sistema mecatrónico, los elementos de entrada de datos deben ser sensores y las salidas deseadas, efectuadas por actuadores.

Considerando que un sistema mecánico posee como variables desplazamientos angulares para ejecutar su accionamiento, es necesario el uso de un sensor que sea capaz de interpretar los cambios angulares con precisión [11].

Dado que buscamos la capacidad del sistema a reproducir un movimiento de tipo “espejo” de la extremidad delantera derecha de un can frente a su opuesta, es necesario determinar las posiciones o los estados de posición de un punto determinado (en este caso la variación de cualquier punto del hombro en la línea normal), por lo que el sistema embebido debe estar unido a la pata sana del perro para poder detectar estas variaciones de posición y, por tanto, su tamaño debe ser pequeño, no tan pesado, que pueda ser adaptado a la pata del animal sin lastimarlo y sin que el sistema electrónico se maltrate o se caiga constantemente.

Con estas condiciones se puede determinar una característica discriminatoria para el sensor a utilizar: el tamaño. Ahora, con estos dos datos podemos encontrar un sensor de tamaño reducido y capaz de medir la variación del ángulo, es decir, un acelerómetro, en este caso se utiliza el MMA7361.

5.1. Sistema embebido de obtención de datos

Siendo que, lo que se necesita de la extremidad sana, es solo la posición de esta con respecto a la normal, es decir, cuando la pata está en la posición de reposo. Se considera esta, la posición de aplomo, como el punto de partida. Siendo que los datos que se deben obtener de este sistema son únicamente datos numéricos, transducidos por el sensor a señales eléctricas, el control que se requiere debe tener un único parámetro de entrada y de salida. Sólo debe emitir un tipo de dato como respuesta.

Dada la simplicidad, el tamaño y el bajo coste, se ha elegido el controlador PIC16F88 de gama media para el diseño del sistema recolector de información, el cual cuenta con entradas analógicas.

En la figura 3 se muestra el diagrama de conexión del primer sistema embebido (sin el elemento de comunicación), en este caso se colocó la conexión con una pantalla LCD 16x2 con un módulo I2C para verificar los datos y la conversión obtenidos de la pierna de Milo.

5.2. Control difuso para sistema de potencia

Para el apartado del control de movimiento del mecanismo, hay que recordar que la hipótesis del presente trabajo se basa en la hipótesis de movimiento planteada por el fisiólogo Milton Hildebrand: los movimientos simétricos son aquellos que poseen una relación espejo con su par colindante, es decir, en movimientos como la caminata o el trote lento, el animal cuadrúpedo respecto a sus extremidades delanteras envía una de estas hacia adelante mientras la opuesta se envía hacia atrás para mantener el equilibrio.

Es decir, mientras existe un posicionamiento para iniciar la fase de impulso y mantener el equilibrio durante desplazamientos simétricos, el animal debe enviar una pata hacia adelante y mantener la otra hacia atrás.

Considerando lo anterior se puede asumir que, si tomamos el plano dorsal o el medial como referencia, existe un desplazamiento angular sobre los ejes x o z dependiendo de la orientación que se quiera tomar para el acelerómetro.

En este caso se toma el plano dorsal o ventral como referencia ya que el MMA7361L presenta problemas al censar el eje z (en caso de colocar el sistema embebido en paralelo con el plano medial), por lo que se coloca en horizontal, iniciando el punto de referencia del movimiento en la posición de aplomo, con las dos extremidades delanteras y considerando el ángulo escapular, ya que aquí se realiza la medición. En la figura 4 se muestra un esquema de cómo podría quedar el primer sistema respecto a la anatomía del perro.

Con esto en mente se propone la generación de un soporte para el sistema embebido del sensor, de tal manera que el aplomo sea el punto “cero” o de grado cero, teniendo el circuito embebido en horizontal y, de acuerdo con el avance o retroceso del miembro sano, se producen ángulos relativos a la aceleración registrada por el sensor.

Se ha elegido un método de toma de decisión por software para el segundo sistema embebido (control de prótesis), siendo este el empleo de un controlador por lógica difusa. Para el diseño del control difuso se ha utilizado el aplicativo Fuzzy Logic Toolbox de Matlab®.

Lo primero en considerar son los valores que va a recibir el sistema de control. Estos valores son los ángulos que se obtuvieron del sistema recolector de datos. Estos valores serán enviados a través de comunicación inalámbrica. Ahora, los datos son grados, y su naturaleza es de índole numérica.

Para que pueda ser parte del control difuso debe ser convertido a un valor difuso, a un valor que entre dentro de una serie de conjuntos y que este mismo valor forme parte de uno o más de estos conjuntos.

Los ángulos tienen, en la geometría clásica, una clasificación de concepto que puede utilizarse para generar los conjuntos difusos, en los que puede entrar cada ángulo con un grado de pertenencia, incrementado dos etiquetas lingüísticas más para ajustar los datos: agudo, medio agudo, recto, medio obtuso y obtuso. Estos conjuntos, como se han descrito, pueden contener con un cierto grado de pertenencia los valores que serán recibidos del primer sistema.

Los valores de pertenencia para cada ángulo son los valores convertidos a difusos. En la figura 5 se muestran los datos fuscados con sus funciones de membresía en los conjuntos difusos.

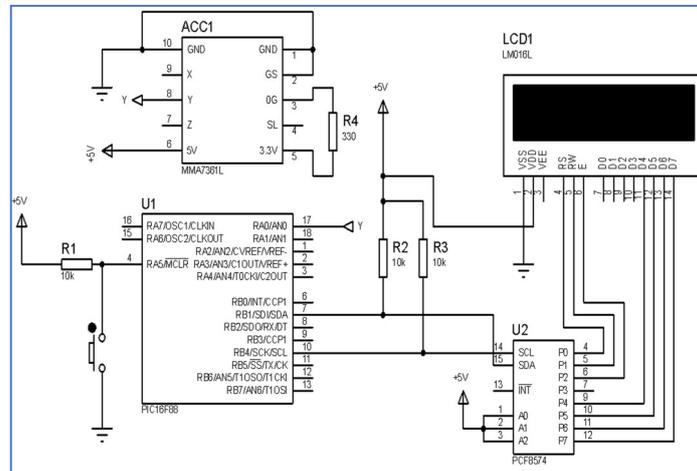


Fig. 3. Esquemático de prueba del acelerómetro MMA7361L.



Fig. 4. Localización del sensor acelerómetro en el cuerpo del perro. Imagen obtenida y modificada a partir de <https://pixabay.com/es/vectors/animal-canino-perro-naranja-1298936/>.

Ahora, ya definidos los conjuntos difusos, es importante replantear la teoría de Hildebrand: se requiere que el movimiento entre las extremidades sea simétrico y consecutivo, como si fuesen las cuchillas de unas tijeras.

Es así como se requiere que, si la extremidad sana avanza, generando por ejemplo un ángulo “agudo”, el mecanismo de potencia genere un giro que permita al prótesis realizar el retroceso para completar el movimiento.

Se ha seleccionado la secuencia de movimiento de la caminata como la secuencia de estudio para las reglas mandantes en el control difuso en la que la relación de los ángulos es contraria para cada evento, es decir, si el primer sistema embebido lee una lectura de un ángulo obtuso, la salida debe corresponder a un agudo; invirtiendo entonces también los conjuntos difusos a la salida, sin embargo, esto es tratado más

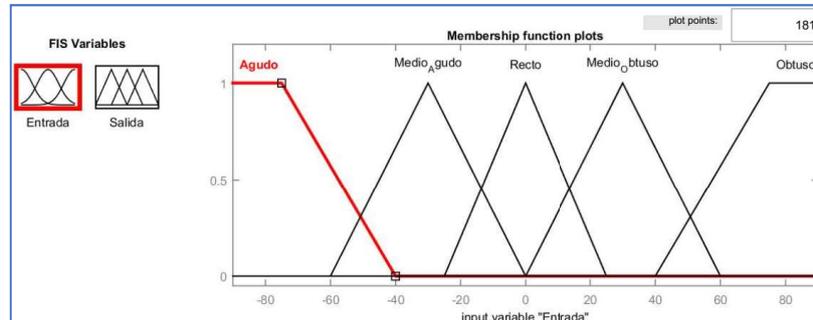


Fig. 5. Conjuntos difusos de entrada de los datos *fusicados*.

adelante. En la figura 6 se muestra el listado de reglas que se propuso para el control difuso.

Con estos datos se puede considerar la salida como un reflejo de los ángulos que se consideran agudos, rectos y obtusos dentro de los conjuntos definidos. En la figura 7 se muestra la distribución de los conjuntos de salida de acuerdo con sus funciones de membresía.

Siendo que ambos universos de conjuntos, tanto salidas como entradas, ya se encuentran en estado de variables difusas, es posible visualizar el comportamiento de las reglas en cualquier dato de entrada que el segundo sistema embebido reciba del primero.

El programa de reconocimiento evalúa el valor enviado por el primer sistema y lo compara dentro del valor asignado para la entrada (de acuerdo con su función de membresía) y sobre las mismas reglas, obteniendo por medio del método del centroide de Mamdani el valor correspondiente a la salida del controlador.

La figura 8 muestra un ejemplo de cómo el controlador difuso evalúa el dato y arroja un dato de salida *defusificado*, convirtiéndose en un dato numérico de la misma naturaleza que la entrada.

Con esto se puede visualizar que el controlador difuso es bidimensional, es decir, ya que solamente maneja una sola entrada se espera que la relación sea de tipo uno a uno, solamente habrá una entrada y la salida es proporcional a dicha salida.

Se ha propuesto el uso de un método de inteligencia artificial para mapear todos los datos posibles que registre el sensor. Ya que la sensibilidad del sensor tiende a inestabilidades y el diseño de un control más robusto está fuera de los alcances de este trabajo, el empleo de la lógica difusa ayuda a “amortiguar” posibles errores al ser capaz de detectar cualquier valor que envíe el acelerómetro y dictar su valor “espejo”. En la figura 9 se muestra la relación conjuntos de entrada y salida mediante una gráfica.

5.3. Servomotor como sistema de potencia mecánica

Para el impulso del sistema mecánico de potencia se utiliza un servomotor, el cual estará reaccionando en función de los valores de salida del controlador difuso. Cabe recordar que estos dispositivos son motores de CD, que poseen un reductor de velocidad



Fig. 6. Reglas del control difuso propuesto para la alternancia de ángulos.

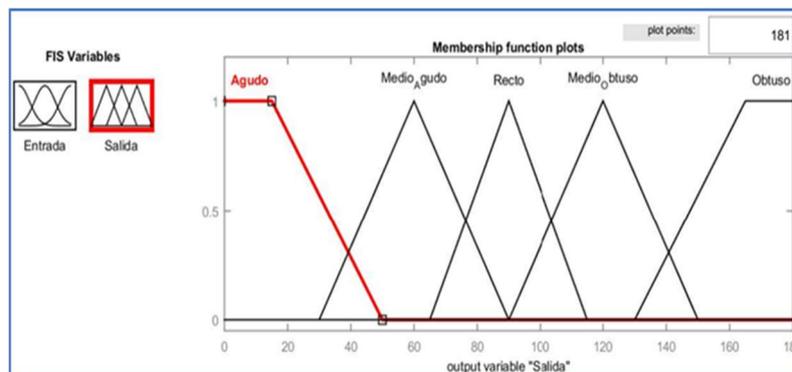


Fig. 7. Variables lingüísticas de la salida en conjuntos difusos.

un multiplicador de torque junto con un circuito de control. Este motor solamente puede dar revoluciones específicas en un rango de 0 a 180°.

Para poder controlar estos giros específicos es necesario aplicar un tren de pulsos de duración y frecuencia específicos. Dependiendo del ancho de las pulsaciones del tren, el sistema de control interno del servo lleva su eje a la posición correspondiente.

La manipulación o modulación de estos anchos de pulso o PWM (Pulse Width Modulation en inglés) consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está en nivel alto, manteniendo el mismo periodo, de tal manera que modifica la posición del eje de acuerdo con este ancho [12].

Ahora, es menester conocer el rango de ángulos y periodos del ancho de pulso en nivel alto del tren para identificar los posibles ángulos que se obtienen del control difuso cuando se evalué, es decir, el controlador difuso es el encargado de enviar el dato de salida al servomotor, pero como un valor de ángulo, es por ello que se requiere conocer el valor del pulso, que corresponde a cada ángulo, que envía el control difuso para que el microcontrolador lo envíe al motor.

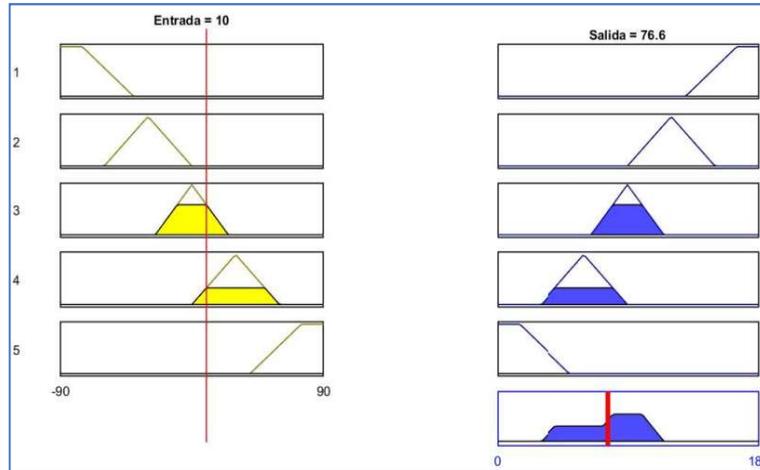


Fig. 8. Método de Mamdani para evaluación de datos de entrada por reglas, defusificado.

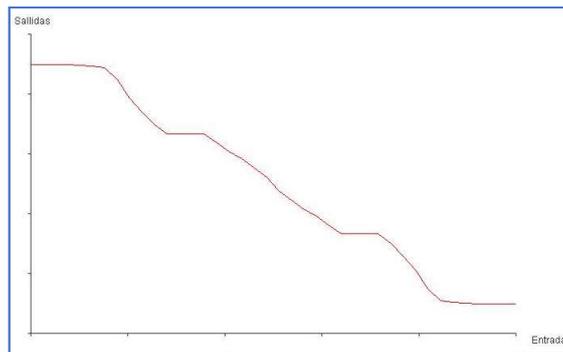


Fig. 9. Superficie de relación de entradas y salidas.

Tabla 1. Relación de ángulos del servomotor y el ancho de pulso del PWM.

Posición (°)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
T. Alta (µs)	30	51	72	92	112	131	150	168	185	202	218	234	250
	0	4	2	5	2	4	0	1	6	5	9	8	1

En la tabla 1 se muestra una relación de ángulos a los cuales se les puede verificar la relación matemática para encontrar la ecuación que rige el comportamiento de los anchos de pulso.

5.4. Sistema de comunicación vía bluetooth

Teniendo la base de acción de ambos sistemas (un emisor de datos o sistema sensor, y un receptor de datos o sistema actuador), el último paso del desarrollo es la comunicación.

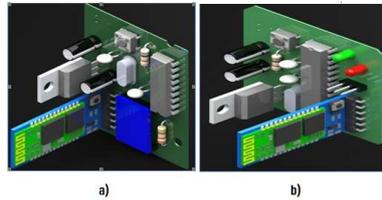


Fig. 10. a) Diseño CAD del circuito emisor; b) diseño CAD del circuito receptor.



Fig. 11. Sistema embebido del sensor con su contenedor: derecha, diseño renderizado; izquierda, producto final.

Se requiere que ambos sistemas trabajen en paralelo enviando y recibiendo información no bidireccionalmente sino unilateralmente, y que por ergonomía y comodidad del animal no se deben utilizar cables que, al final, sufrirán desgaste y quizá el perro llegue a morder o arrancar.

Es necesaria una comunicación inalámbrica y el medio más económico que puede encontrarse, sin recurrir a un módulo de radiofrecuencia es un módulo bluetooth, el cual ha sido utilizado en diferentes proyectos del Internet de las Cosas (IoT) [13, 14,15].

Los módulos con los que se trabaja para la comunicación entre ambos sistemas son los conocidos HC05.

6. Creación del circuito impreso

Con los esquemáticos ya creados, se genera el circuito impreso en placa fenólica para el montaje del prototipo de prótesis o PCB (*printed circuit board*). Es importante generar en primer lugar los sistemas embebidos para diseñar los contenedores mecánicos tanto para el dispositivo de transmisión de datos como el que va ligado al mecanismo ya diseñado.

Para esto se ha utilizado un software CAD para diseño de circuitos electrónicos, el mismo que se ha usado para generar los esquemáticos. En las figuras 10 a) y b) se muestran los circuitos generados por el programa CAD de diseño de circuitos electrónicos.

El resultado del ensamble para el sistema sensor con el acelerómetro MMA7361L y el microcontrolador PIC16F88 se muestra en la figura 11 junto con un renderizado del diseño original. Ahora, el diseño para el segundo sistema no solamente implica la adaptación del sistema electrónico de control, sino que además debe contener un espacio para ajustarse sobre el cuerpo del perro y el acople con el mecanismo motor.



Fig. 12. Adaptador del mecanismo para el muñón (modelo renderizado).

Una vez concluida la parte de control, así como el diseño del mecanismo del protésico, es necesaria la construcción de un aditamento que pueda colocársele a Milo en torno al muñón de su pata amputada, así como la posibilidad de colocársele de manera “embebida” tanto el sistema de control de potencia, el motor y la alimentación.

Durante las revisiones al perro se calcó el perfil del muñón para realizar un adaptador hueco.

Esto se realizó con la intención de crear una superficie para generar un sólido hueco o de tipo cascarón. Siendo el volumen de éste muy grande para el proceso de modelado se ha propuesto para este prototipo la división en dos del cascarón del sujetador, esto con el propósito de permitir al servomotor ajustarse sobre éste y permita las demás partes del protésico ser conectadas entre sí sin ocupar aditamentos mecánicos especiales para enlazar cada eslabón. En la figura 12 se muestra el modelo CAD de esta sección (sin las cavidades para insertar el circuito embebido de control y la batería).

7. Pruebas

A lo largo de este artículo se ha descrito el desarrollo de dos sistemas embebidos que forman parte de la prótesis en la cual se implementó el controlador difuso, uno de ellos es el sistema que capta los movimientos del pie sano de Milo, y el otro sistema, que se encuentra en la extremidad amputada.

Este último capta la señal del sistema de adquisición y los procesa por medio del controlador difuso, y de esta forma genera una salida que da como resultado el movimiento natural de la prótesis de la pierna amputada. Cuando se ha implementado en Milo, el sistema de transmisión ha funcionado adecuadamente, el sistema embebido uno, ha captado correctamente los datos de los ángulos del movimiento del pie sano, así mismo, el controlador difuso ha funcionado adecuadamente, generando ese movimiento de espejo deseado.

Hasta este punto, todo funciona adecuadamente, sin embargo, si ha existido un problema, y es el tiempo de respuesta del sistema, es decir, a pesar de que el procesamiento se está realizando de forma adecuada, los tiempos de respuesta no han sido óptimos, lo que genera un mal funcionamiento en la finalidad de la prótesis, tal que, buscamos que el can se pueda mover de forma natural y sin lastimar ninguna parte de su cuerpo.

Para fines de este artículo, se ha logrado la meta de lograr el funcionamiento adecuado del controlador difuso dentro de nuestra prótesis, sin embargo, actualmente se sigue trabajando en la manera de mejorar los tiempos de respuesta de interconexión y procesamiento de nuestros sistemas embebidos.

Esto, se deja en este momento como trabajo a futuro, así como la conexión con el sistema IoT. Adicionalmente, se está trabajando en el desarrollo mecánico de la prótesis, sin embargo, esta parte queda fuera del objetivo de este artículo.

8. Conclusiones

En este artículo se ha descrito el desarrollo de un sistema de control difuso que es implementado en un prototipo de prótesis para un perro con la pierna derecha amputada.

Se diseñó un controlador que busca ajustarse a la hipótesis de Hildebrand, generando un comportamiento de espejo entre la pierna sana y la respuesta en la prótesis de la pierna amputada. Por medio de un acelerómetro, se han captado los movimientos de la extremidad sana, y estos han sido enviados a un controlador difuso, para que este genere el comportamiento de espejo antes mencionado.

El controlador ha dado los resultados esperados en su implementación, el movimiento de las extremidades del can se realiza de manera satisfactoria, sin embargo, se ha detectado un problema en la velocidad de respuesta, esto dado principalmente por la interconexión, comunicación y procesamiento de datos, lo cual tiene que ver con un retardo en el envío y recepción de datos. La resolución de este problema dentro del funcionamiento de los sistemas embebidos diseñados se deja como un trabajo a futuro.

Agradecimientos. Este artículo fue apoyado por los proyectos PAPIME PE103322, PAPIME PE105822 y Cátedra de investigación CI2254 de la UNAM y la FES-C.

Referencias

1. Ponce-Cruz, P.: *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Ciudad de México: Alfaomega (2011)
2. Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353 (1965) doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
3. Sharma, K., Agrawal, A., Bandopadhyaya, S.: Fuzzy Logic Controlled Variable Frequency Drives. In: Yadav, N., Yadav, A., Bansal, J., Deep, K., Kim, J. (eds) *Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Singapore, vol. 741, pp. 1153–1164 (2019). doi: 10.1007/978-981-13-0761-4_107
4. Jamin, N. F., Ghani, N. M., Ibrahim, Z., Masrom, M. F., Razali, N., Almeshal, A. M.: Two-wheeled wheelchair stabilization using interval type-2 fuzzy logic controller. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 31–37 (2018) doi: 10.5013/IJSSST.a.19.03.03
5. Castillo, O., Aguilar, L. T.: *Fuzzy Control for Wheeled Mobile Robots. Type-2 Fuzzy Logic in Control of Nonsmooth Systems. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, Springer, Cham. vol 373, pp.85–96 (2019) doi: 10.1007/978-3-030-03134-3_6

6. Pau, V., Salerno, V. M.: Wireless Sensor Networks for Smart Homes: A Fuzzy-Based Solution for an Energy-Effective Duty Cycle, *Electronics.*, vol. 8, no. 2, pp. 131 (2019) doi: 10.3390/electronics8020131
7. Weir, R. F., Ajiboye, A. B.: A multifunction prosthesis controller based on fuzzy-logic techniques. In: *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE Cat. No. 03CH37439)*, vol. 2, pp. 1678–1681 (2003) doi: 10.1109/IEMBS.2003.1279711
8. Nordin, N. H. D., Muthalif, A. G. A., Razali, M. K. M., Ali, A., Salem, A. M. Development and implementation of energy-efficient Magnetorheological Fluid bypass damper for prosthetics limbs using a fuzzy-logic controller. In: *Proceedings of IEEE Access*, vol. 10, pp. 18978–18987 (2022) doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149893
9. Ghazali, R., Saad, M. Z., Hussien, S. Y. S., Jali, M. H., Zohedi, F. N., Izzuddin, T. A. Intelligent controller design for multifunctional prosthetics hand. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 6, no. 6, pp. 495–501 (2017) doi: 10.18178/ijmerr.6.6.495-501
10. Hildebrand, M.: Analysis of the symmetrical gaits of tetrapods. In: Herman, R.M., Grillner, S., Stein, P.S.G., Stuart, D.G. (eds) *Neural Control of Locomotion. Advances in Behavioral Biology*, vol 18. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0964-3_9
11. Bolton, W.: *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*. México D.F.: Alfaomega (2013)
12. Corona-Ramírez, L., Abarca-Jiménez, G.: *Sensores y Actuadores. Aplicaciones con Arduino*. Ciudad de México: Patria Education (2019)
13. Harris III, A. F., Khanna, V., Tuncay, G., Want, R., Kravets, R.: Bluetooth low energy in dense IoT environments. In: *Proceedings of IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 30–36 (2016) doi: 10.1109/MCOM.2016.1600546CM
14. Collotta, M., Pau, G., Talty, T., Tonguz, O. K.: Bluetooth 5: A concrete step forward toward the IoT. In: *Proceedings of IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 125–131 (2018) doi: 10.1109/MCOM.2018.1700053
15. Terán, M., Aranda, J., Carrillo, H., Mendez, D., & Parra, C.: IoT-based system for indoor location using bluetooth low energy. In: *Proceedings of IEEE Colombian Conference on Communications and Computing COLCOM*, pp. 1–6 (2017) doi: 10.1109/ColComCon.2017.8088211