

ADAPTACIÓN DIFUSA DE UNA FORMACIÓN LÍDER-SEGUIDOR CONTROLADA POR COMPORTAMIENTOS BASADOS EN ESPACIO NULO

Quintana Carapia, Gustavo^{1,2,3}, Benítez Read, Jorge S.^{1,2}, Segovia De los Ríos, J. Armando^{1,2},
y Mier Quiroga, Luis A.¹

¹Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado.
Av. Tecnológico s/n, Ex-Rancho la Virgen, Metepec, México, C.P. 52140.

²Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares,
Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, C.P. 52750.

³Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería.
Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria, Toluca, C.P. 50110.
Correo-e: {gustavo.quintana, jorge.benitez, armando.segovia} @inin.gob.mx
Teléfono: +52 (55) 5329 7200 ext. 13704.

RESUMEN.

En este artículo se presenta el diseño de funciones de tareas requeridas para que un grupo de robots realice una misión en particular. La combinación de las funciones de tareas permite el movimiento del grupo de robots manteniendo una formación líder seguidor y evita las colisiones entre los miembros del grupo. El control por comportamientos basado en espacio nulo es adaptado para ser utilizado en robots no-holónicos y además incluye la configuración completa, posición y orientación, en la definición de las funciones de tareas. Las nuevas funciones de tareas se desarrollan considerando el control de tipo descentralizado en el planteamiento de las funciones. Las ganancias de las funciones de tareas se regulan utilizando lógica difusa. Esto tiene la finalidad de evitar la saturación de los actuadores. Se realizan simulaciones para comprobar la efectividad de la propuesta.

Palabras Clave: robots móviles, control por comportamientos basado en espacio nulo y formación de robots

ABSTRACT.

In this paper a design of task functions to perform a particular mission is presented. The task functions combination allows the robots group to move in leader-follower formation and to avoid collisions among the group members. The null space based behavior control is extended to be used on non-holonomic robots and includes a complete configuration, position and heading, in the task functions definition. The new task functions are designed considering a decentralized scheme. Furthermore, the task functions gains are regulated by fuzzy logic. The latter adds the capability of preventing the actuator saturation, i.e. the robot wheel motors. Simulations are performed to test the effectiveness of the proposed design.

Keywords: mobile robots, null space based behavior control, robot formation

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina formación a un grupo de robots móviles, cuyos integrantes son capaces de mantener una serie de posiciones predefinidas entre ellos. En una formación, el grupo es capaz de moverse como si se tratara de un solo individuo [1]. Generalmente cada miembro del grupo sigue reglas sencillas, por ejemplo: evitar colisiones con otros miembros, igualar la

velocidad de los vecinos, tratar de mantenerse cerca de los miembros cercanos, entre otras. Las aplicaciones de las formaciones de robots incluyen la localización, la exploración, la manipulación de objetos y la conducción de vehículos no tripulados.

Existen varias formas de controlar las acciones de un robot, entre las que destaca, por su robustez y versatilidad, el control por comportamientos [2]. En el control por comportamientos, el problema general se descompone en sub-problemas, los cuales se resuelven en paralelo. Posteriormente, se combinan los resultados obtenidos de la ejecución en paralelo para originar la orden que mejor resuelve el problema general. Esta orden es dada al robot para ejecutar la acción deseada. Algunos sinónimos del término “sub-problema” son “comportamiento” y “tarea”. La división del problema general en diferentes comportamientos permite realizar acciones complejas, como la navegación en entornos desconocidos. Se debe mencionar que el control por comportamientos tiene la dificultad principal en la terminación asíncrona de la ejecución de los comportamientos individuales. Esta falta de sincronía puede provocar órdenes de control equivocadas.

Para contrarrestar los efectos negativos de la falta de sincronía se proponen diferentes alternativas. Las soluciones al problema de la combinación de comportamientos se obtienen principalmente por dos métodos: competitivo o cooperativo. El método competitivo se caracteriza por considerar un solo comportamiento para crear la orden de control. De esta manera, los diferentes comportamientos activos compiten por llegar a ser el único elegido. El ejemplo clásico del método competitivo es el control distribuido por capas [2]. Por otra parte, el método cooperativo considera la aportación de todos los comportamientos activos mediante una suma ponderada de sus resultados. De esta manera todos los comportamientos participan en la generación de la orden de control. El esquema de control de movimientos [3] es un ejemplo de la aplicación del método cooperativo.

Existe un método que realiza la combinación de comportamientos de manera híbrida, es decir, utilizando ambos

enfoques. En el aspecto competitivo, le asigna una prioridad relativa a cada comportamiento, mientras que de forma cooperativa realiza la proyección, de cada comportamiento, sobre el espacio nulo de los comportamientos de mayor prioridad. Este método se denomina “control por comportamientos basado en espacio nulo” (NSB), y se ha empleado tanto en manipuladores redundantes [4] como en robots móviles [5]. En la literatura del control NSB, a los comportamientos se les llama comúnmente “funciones de tareas”.

En la sección 2 de este trabajo se presenta la adaptación del control NSB para ser utilizado en robots móviles de tipo diferencial y no-holonómicos. En la sección 3 se describe el diseño de las funciones de tareas de acuerdo a la misión que se quiere obtener: movimiento del grupo de robots manteniendo una formación líder seguidor, bajo el esquema de control descentralizado. La sección 4 presenta la adaptación difusa de las ganancias de los comportamientos diseñados. En la sección 5 se discuten las simulaciones realizadas con las que se comprueba la efectividad de la propuesta. Finalmente, la sección 6 concluye este trabajo.

2. CONTROL NSB EN ROBOTS NO-HOLONÓMICOS

El modelo cinemático de un robot móvil diferencial no-holonómico, que se maneja por medio de dos ruedas estándar [6] está dado por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (v_l + v_r) \cos \theta / 2 = v \cos \theta \\ \dot{y} &= (v_l + v_r) \sin \theta / 2 = v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= (v_l - v_r) / 2b = \omega\end{aligned}\quad (1)$$

donde el vector $\mathbf{q} = [x, y, \theta]^T$ representa la configuración del robot puesto que contiene la posición del centro del eje de las ruedas $\mathbf{p} = (x, y)$ y la orientación del cuerpo del robot θ el marco de referencia global, ver figura 1. La longitud b es la distancia desde el punto \mathbf{p} a cada uno de los centros de rotación de las ruedas. Las velocidades v_l y v_r son las velocidades tangenciales de las ruedas izquierda y derecha, respectivamente, mientras que v y ω son las velocidades tangencial y angular del robot móvil. En forma matricial, las velocidades del robot se relacionan como sigue [6]:

$$\begin{bmatrix} v_l \\ v_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b \\ 1 & 0 & -b \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Se puede observar que para controlar el movimiento del robot móvil en su espacio de trabajo, se deben aplicar velocidades adecuadas a ambas ruedas. El procedimiento con el que se obtienen las velocidades de las ruedas se describe a continuación.

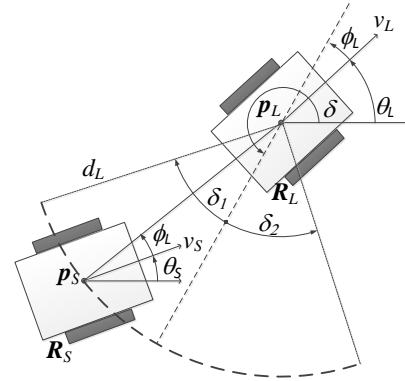


Figura. 1. Relaciones geométricas de la formación (d_L, ϕ_L) .

El control NSB expresa los diferentes comportamientos usando las funciones de tareas. El argumento de cada función de tareas $\sigma = f(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^m$ contiene la configuración del robot. Esta manera de establecer los comportamientos permite que la propia función de tareas sea útil para medir el grado de cumplimiento de cada tarea como resultado de los movimientos del robot. La diferencia entre el valor instantáneo de σ y el valor deseado de la función de tareas σ_d , expresado con $\tilde{\sigma} = \sigma_d - \sigma$ es un recurso valioso en el diseño de cada función de tareas. El diseño puede realizarse estableciendo σ y σ_d de tal manera que durante los desplazamientos del robot, la diferencia $\tilde{\sigma}$ vaya disminuyendo conforme el propósito del comportamiento vaya siendo alcanzado.

Si se deriva la función de tareas σ se llega a una relación directa entre la tasa de cambio $\dot{\sigma}$ y las velocidades del robot:

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

donde la matriz $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ es una matriz Jacobiana que hace las veces de una constante de proporcionalidad.

Las velocidades $\dot{\mathbf{q}}$ pueden obtenerse en términos de la tasa de cambio de la función de tareas $\dot{\sigma}$ a través de la inversa de la matriz Jacobiana. Si se da el caso que $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ no sea cuadrada, entonces se busca la pseudoinversa $\mathbf{J}^\dagger(\mathbf{q})$ mediante mínimos cuadrados, aplicando el método de inversión Moore-Penrose, con la que se llega a la solución única [7]:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\dagger \dot{\sigma} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\sigma} \quad (4)$$

Es necesario entonces definir un valor determinado de la tasa de cambio de la función de tareas $\dot{\sigma}$ para obtener velocidades adecuadas para el movimiento esperado del robot. En la definición de $\dot{\sigma}$ es importante considerar la diferencia $\tilde{\sigma}$:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T)^{-1} (\dot{\sigma}_d + \Lambda \tilde{\sigma}) \quad (5)$$

donde la matriz Λ es una matriz diagonal de ganancias.

Al sustituir la ecuación (5) en la ecuación (2), las funciones de tareas pueden controlar los movimientos de un robot móvil no-holónico por medio de:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = \begin{bmatrix} v_l \\ v_r \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{G} \mathbf{J}^+ (\dot{\boldsymbol{\sigma}}_d + \mathbf{A} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}) \quad (6)$$

La formación de robots puede diseñarse como una combinación de dos o más funciones de tareas. En el control NSB, las funciones de tareas se ordenan jerárquicamente en términos de la prioridad para la formación de robots. La función de prioridad más alta es la tarea primaria. En orden descendiente, las funciones de prioridades menores son las tareas secundaria, terciaria, y así sucesivamente. Las velocidades de la función con prioridad i se pueden expresar:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_i = \mathbf{G} \mathbf{J}_i^+ (\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{i,d} + \mathbf{A}_i \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_i) \quad \dot{\boldsymbol{\phi}}_o = \mathbf{G} \mathbf{J}_o^+ (\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{o,d} + \mathbf{A}_o \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_o) \quad (7)$$

El orden jerárquico de las funciones es útil al combinar las diferentes velocidades de las tareas diseñadas. En el control NSB, la velocidad de cada función se proyecta sobre el espacio nulo de la función con la prioridad inmediata superior, como se muestra a continuación:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_d = \begin{bmatrix} v_{L,d} \\ v_{R,d} \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{\boldsymbol{\phi}}_1 + \mathbf{N}_1 (\dot{\boldsymbol{\phi}}_2 + \mathbf{N}_2 (\dot{\boldsymbol{\phi}}_3 + \dots)) \quad (8)$$

donde el espacio nulo de la función con prioridad i se define como $\mathbf{N}_i = \mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{J}_i^+ \mathbf{J}_i \mathbf{G}^{-1}$.

La proyección sobre el espacio nulo agrega la contribución de cada función de tal manera que sus velocidades no se oponen a las correspondientes a la función de prioridad superior. Cuando existen contradicciones es las velocidades de dos o más funciones, las velocidades de las funciones de menor prioridad son reducidas por \mathbf{N}_i al agregarse.

3. DISEÑO DE FUNCIONES DE TAREAS NSB.

Uno de los comportamientos esenciales es el que se encarga de prevenir las colisiones con los obstáculos cercanos al robot. Los obstáculos pueden ser los mismos robots del grupo que se interponen en la trayectoria de cada robot y también objetos ajenos al grupo de robots. Por lo general los robots disponen de algún sensor exteroceptivo para detectar los objetos a su alrededor. Para este fin, los robots Pioneer 3-DX (P3DX) tienen ocho sensores de ultrasonido, colocados al frente, en su plataforma base [8]. En este trabajo, las funciones de tareas diseñadas se simulan aplicadas a un grupo de robots P3DX.

En primer lugar, para evitar las colisiones con obstáculos se requiere una función de tareas $\boldsymbol{\sigma}_o$ que mida la distancia y la orientación a la que se encuentran los obstáculos con respecto a cada robot. Esta función de tareas $\boldsymbol{\sigma}_o$ puede expresarse como:

$$\boldsymbol{\sigma}_o = \begin{bmatrix} 1/(1 + e^{-k_d(\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i\| - d_{tol})}) \\ 1/(1 + e^{-k_a(\text{atan2}(\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i) - a_{tol}))} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Con esta función, incluso se puede determinar el momento de su activación. Cuando la distancia o la orientación instantáneas son menores que los valores predefinidos de tolerancia, d_{tol} y a_{tol} respectivamente, los valores de los elementos de la función $\boldsymbol{\sigma}_o$ conmutan de 1 a 0. Las constantes k_d y k_a pueden ajustarse para que esta conmutación sea rápida o lenta.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, si el obstáculo está lejos y fuera de la trayectoria del robot, ambos elementos de la función $\boldsymbol{\sigma}_o$ son iguales a 1. Esto permite definir el valor deseado de la función como: $\boldsymbol{\sigma}_{o,des} = [1 \ 1]^T$.

Los obstáculos se evitan controlando la distancia, y la orientación, manteniéndose mayores que los valores de seguridad. El avance del robot de manera se permite sólo por los costados del obstáculo.

La matriz Jacobiana \mathbf{J}_o que se obtiene de acuerdo a la ecuación (3) es:

$$\mathbf{J}_o = \begin{pmatrix} -\frac{J_{1n}(p_{ox} - p_{ix})}{d_o(J_{1d})^2} & -\frac{J_{1n}(p_{oy} - p_{iy})}{d_o(J_{1d})^2} & 0 \\ \frac{J_{2n}(p_{oy} - p_{iy})}{(d_o J_{2d})^2} & -\frac{J_{2n}(p_{ox} - p_{ix})}{(d_o J_{2d})^2} & -\frac{J_{2n}}{(J_{2d})^2} \end{pmatrix} \quad (10)$$

donde la distancia y la orientación de los obstáculos con respecto a cada robot son $d_o = \|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i)^T (\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i)}$ y $a_{oi} = \text{atan}((p_{oy} - p_{iy})/(p_{ox} - p_{ix}))$, respectivamente. Los demás factores de los elementos de la matriz \mathbf{J}_o están descritos por:

$$\begin{aligned} J_{1n} &= k_d e^{-k_d(d_{OR} - d_{tol})} \\ J_{2n} &= k_a e^{-k_a(a_{OR} - a_{tol})} \\ J_{1d} &= 1 + e^{-k_d(d_{OR} - d_{tol})} \quad y \\ J_{2d} &= 1 + e^{-k_a(a_{OR} - a_{tol})}. \end{aligned} \quad (11)$$

Una segunda función de tareas es necesaria para colocar los robots en formación. Cuando en una formación uno de los robots sigue los movimientos de otro robot, a los robots se les llama seguidor y líder, R_s y R_L , respectivamente. En una formación líder seguidor (d_L, ϕ_L) , como la que se muestra en la figura 1, se controla tanto la distancia d_L como la orientación relativa ϕ_L existente entre cada par de robots, de tal manera que siempre se cumpla con:

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{p}_S + d_L (\cos(\theta_S + \phi_L), \sin(\theta_S + \phi_L))^T \quad (12)$$

donde $d_L > 0$ y $-\pi/2 < \phi_L < \pi/2$. A partir de esta relación podemos generar dos funciones de tareas. En primer lugar, una función de tareas encargada de colocar al robot seguidor en formación (d_L, ϕ_L) puede ser expresada mediante:

$$\sigma_f = \begin{bmatrix} \|\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S\| \\ \text{atan2}(\mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S) - \theta_S \end{bmatrix} \quad (13)$$

Con el primer componente de la función de tareas σ_f se mide la distancia euclidiana, mientras que con el segundo componente se mide el error angular, presentes entre los robots seguidor y líder. En este caso, el valor deseado de los componentes de la función de tareas σ_f son los valores predefinidos para d_L y ϕ_L , es decir: $\sigma_{o_{des}} = [d_L \ \phi_L]^T$.

Conforme se vayan desplazando los robots, el seguidor buscará colocarse en formación (d_L, ϕ_L) por la acción de la función de tareas σ_f , la cual tiene asociada la siguiente matriz Jacobiana:

$$J_f = \begin{pmatrix} -\frac{p_{Lx}-p_{Sx}}{\|\mathbf{p}_L-\mathbf{p}_S\|} & -\frac{p_{Ly}-p_{Sy}}{\|\mathbf{p}_L-\mathbf{p}_S\|} & 0 \\ \frac{p_{Ly}-p_{Sy}}{\|\mathbf{p}_L-\mathbf{p}_S\|^2} & -\frac{p_{Lx}-p_{Sx}}{\|\mathbf{p}_L-\mathbf{p}_S\|^2} & -1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Por otro lado, es importante tomar en cuenta que el movimiento de los robots es controlado por las velocidades de sus ruedas. Estas velocidades deben estar restringidas en un rango de tal manera que se impida la saturación de sus motores.

Si se define la curvatura de la trayectoria del robot como $\kappa = \omega/v$, para $v \neq 0$, se puede decir que la trayectoria de un robot R_j está limitada por los valores máximos V_j , K_j^- y K_j^+ , de tal manera que:

$$0 < v \leq V_j \quad y \quad K_j^- < \kappa \leq K_j^+ \quad (15)$$

donde K_j^- y K_j^+ son las curvaturas máximas, negativa y positiva respectivamente, que puede tener la trayectoria del robot, en la que la velocidad no poder ser mayor a V_j .

Desde este punto de vista, las restricciones físicas a las que el robot está sujeto se pueden expresar mediante $0 < v \leq V_M$ y $K_M^- < \kappa \leq K_M^+$. En este caso, los límites mecánicos, los que no deben ser rebasados para prevenir la saturación de los actuadores, están representados por K_M^- y K_M^+ para las curvaturas y por V_M para la velocidad.

A partir de la geometría de la formación (d_L, ϕ_L) expuesta en la figura 1, se puede demostrar que se cumplen las siguientes propiedades [1]:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{d_L} &\leq K_L^- \leq K_L^+ \leq \frac{1}{d_L \cos \phi_L}, \quad \phi_L \geq 0 \\ -\frac{1}{d_L \cos \phi_L} &\leq K_L^- \leq K_L^+ \leq \frac{1}{d_L}, \quad \phi_L < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\tilde{K}_L^- \leq K_L^- \leq K_L^+ \leq \tilde{K}_L^+ \quad (17)$$

$$V_L \cos \alpha_{min} \leq V_M \cos \phi_L \quad (18)$$

$$\arcsen(K_L^- d_L \cos \phi_L) \leq \theta_L(t) - \theta_S(t) \leq \arcsen(K_L^+ d_L \cos \phi_L) \quad (19)$$

donde las variables \tilde{K}_L^\pm y α_{min} están dadas por:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_L^\pm &= \left(\text{sign}(K_M^\pm) \right) / \sqrt{\left(\frac{1}{K_M^\pm} - d_L \sin \phi_L \right)^2 + d_L^2 \cos^2 \phi_L} \\ \alpha_{min} &= \min \left(0, \arcsen(K_L^+ d_L \cos \phi_L) - \phi_L, \phi_L - \arcsen(K_L^- d_L \cos \phi_L) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

La propiedad expresada en la ecuación (19) relaciona la diferencia de las orientaciones $\theta_L - \theta_S$ con la curvatura K_L^\pm de la trayectoria que sigue el robot líder, con la distancia d_L y con la orientación ϕ_L . Esto significa que la posición del robot seguidor tiene la flexibilidad de cambiar sobre un arco de circunferencia centrado en la posición del robot líder.

Para que las propiedades mostradas en las ecuaciones (16) a (19) se cumplan durante el desplazamiento de los robots, manteniendo la formación (d_L, ϕ_L) , las velocidades del robot seguidor deben ser las siguientes:

$$v_S = v_L \frac{\cos(\theta_L - \theta_S - \phi_L)}{\cos \phi_L} \quad y \quad \omega_S = v_L \frac{\sin(\theta_L - \theta_S)}{d_L \cos \phi_L} \quad (21)$$

Esta condición de velocidades, que previene la saturación de los actuadores del robot seguidor mientras se mueve la formación (d_L, ϕ_L) , puede ser obtenida con la siguiente función de tareas:

$$\sigma_S = \mathbf{p}_L - \mathbf{p}_S - d_L \left(\cos(\theta_S + \phi_L), \sin(\theta_S + \phi_L) \right)^T \quad (22)$$

Si se observa la expresión (12), la función de tareas σ_S mide el error existente de la formación en cada instante de tiempo. Por esta razón, el valor deseado es $\sigma_{S_{des}} = \mathbf{0}$. Utilizando el procedimiento descrito en la ecuación (3) se obtiene la matriz Jacobiana de esta tercera función de tareas:

$$J_S = \begin{pmatrix} -1 & 0 & d_L \sin(\theta_S + \phi_L) \\ 0 & -1 & -d_L \cos(\theta_S + \phi_L) \end{pmatrix} \quad (23)$$

La combinación de las velocidades de los diferentes comportamientos se realiza proyectando las velocidades de prioridad menor sobre el espacio nulo de las velocidades de prioridad mayor:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_d = \begin{bmatrix} v_{L,d} \\ v_{R,d} \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{\boldsymbol{\phi}}_o + \mathbf{N}_0 \left(\dot{\boldsymbol{\phi}}_f + \mathbf{N}_f(\dot{\boldsymbol{\phi}}_s) \right) \quad (24)$$

4. REGULACIÓN DIFUSA DE LAS GANANCIAS

La saturación de los actuadores es consecuencia de un exceso de velocidad de una o varias tareas de funciones. La saturación

provocada por comportamientos de prioridad baja impacta negativamente en la orden de control final puesto que corrompe a los comportamientos de mayor prioridad [9]. En este artículo, las ganancias de las funciones de tareas se adaptan mediante lógica difusa. De esta manera se preserva la jerarquía del esquema de control NSB y se previene la existencia de velocidades excesivas como resultado de los comportamientos. Los sistemas de lógica difusa son una herramienta eficiente que resuelve satisfactoriamente problemas en robótica [10].

La matrix A en la ecuación (5) es una matriz diagonal de coeficientes proporcionales que por lo general se mantienen constantes en otros trabajos de la literatura. En este trabajo, los elementos de las matrices A_f and A_s son regulados por medio de sistemas de lógica difusa. Con esta adaptación también se mejora la respuesta del controlador NSB al modificar la velocidades de los comportamientos y de la misión en general. Los sistemas de lógica difusa implementados se muestran en la figura 2.

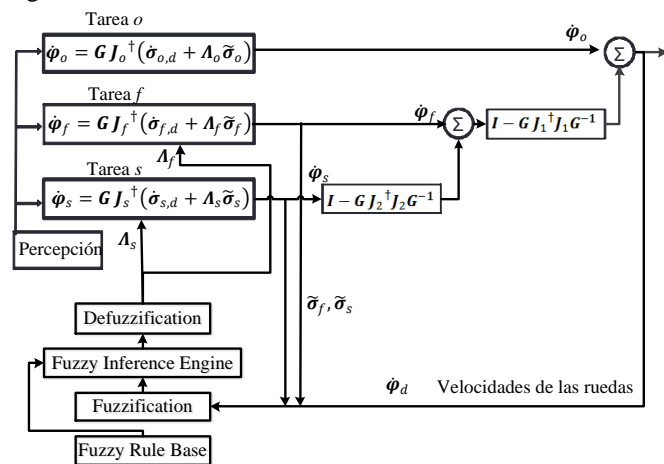


Figura. 2. Comportamientos regulados por lógica difusa.

Los sistemas de lógica difusa implementados tienen seis entradas y cuatro salidas. Las entradas son los componentes de σ_f , σ_{fd} , y $\sigma_{f\theta}$, los componentes de σ_s , σ_{sx} , y σ_{sy} , y las velocidades de las ruedas izquierda y derecha, v_L y v_R .

Las salidas son los componentes de Λ_f , λ_{fd} , y $\lambda_{f\theta}$, y los componentes de Λ_s , λ_{sx} , y λ_{sy} .

Los errores instantáneos σ_{fd} , σ_{sx} y σ_{sy} se representan por conjuntos lingüísticos de cinco variables $\{VS, S, M, B, VB\}$, que significan Muy Pequeño, Pequeño, Medio, Grande y Muy Grande (siglas en inglés), respectivamente. El error instantáneo $\sigma_{s\theta}$, y los valores instantáneos de las velocidades de las ruedas v_L y v_R , se representan por sendos conjuntos de cinco variables lingüísticas $\{VN, N, Z, P, VP\}$, que significan Muy Negativo, Negativo, Cero, Positivo y Muy Positivo (siglas en inglés), respectivamente. Estos conjuntos se representan en la figura 3. Los conjuntos lingüísticos de las salidas λ_{fd} , $\lambda_{f\theta}$, λ_{sx} , y λ_{sy} de seis variables $\{Z, VS, S, M, B, VB\}$.

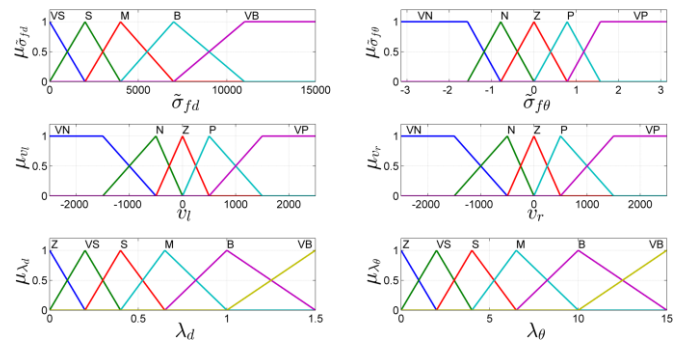


Figura. 3. Funciones de membresía del sistema difuso.

5. RESULTADOS.

Los experimentos de la formación líder seguidor propuesta se realizaron utilizando el ambiente de simulación MobileSim y los algoritmos están programados en Matlab-Aria [8]. Los resultados preliminares son alentadores. En la figura 4 se muestra una imagen de las trayectorias seguidas por seis robots seguidores y un líder. Las posiciones iniciales son aleatorias. El robot líder se mueve describiendo una circunferencia. Los robots seguidores se colocan en formación (d_L, ϕ_L) siguiendo al líder. Los valores establecidos para la formación son $d_L = 2\text{ m}$ y $\phi_L = \pi/4\text{ rad}$ para los dos robots que van justo detrás del líder y $d_L = 2\text{ m}$ y $\phi_L = \pi/8\text{ rad}$ para los cuatro últimos robots. Las líneas rectas en la figura 4 representan el alcance de los sensores de ultrasonidos.

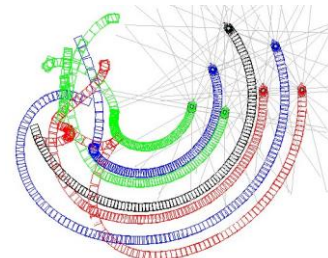


Figura. 4. Grupo de siete robots en formación (d_L, ϕ_i) .

En la figura 5, izquierda, se muestra una gráfica de los errores de los componentes de la función de tareas σ_o que individualmente calculan los robots seguidores. Se aprecia la activación de los componentes sólo cuando es necesario alejarse para evitar la colisión con los otros robots, que estando tan cerca se consideran obstáculos. Se observa que cuando parten de las posiciones iniciales aleatorias, hay una probabilidad mayor de que cada robot colisione con los demás al buscar colocarse en formación. Una vez que la formación se alcanza, el grupo se mueve sin que los robots tengan riesgo de colisión.

Las velocidades, de las ruedas izquierda y derecha de los seis seguidores, observadas durante la simulación, se presentan en la figura 5, derecha. Se debe tener cuidado con la saturación de los actuadores. El fabricante recomienda una velocidad máxima

de 2200 mm/s para las ruedas de los robots P3DX [8]. La implementación de un mecanismo de control difuso que previene la saturación de los actuadores mejora el desempeño de la velocidad.

En la gráfica de la figura 6 se muestran los errores instantáneos de los componentes de las funciones de tareas σ_f y σ_s , de los seis robots seguidores. Cada seguidor busca al líder y posteriormente se coloca en formación. Conforme cada seguidor se coloca mejor en la formación, los errores correspondientes se aproximan a cero.

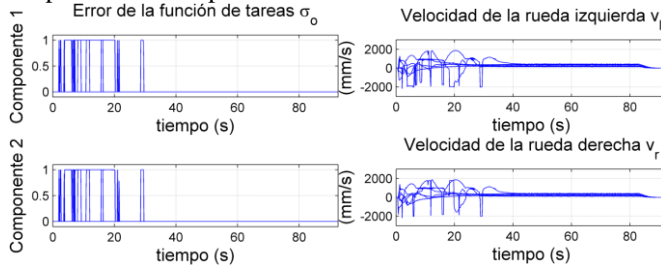


Figura 5. Error de la función de tareas σ_o y velocidades observadas en los robots seguidores.

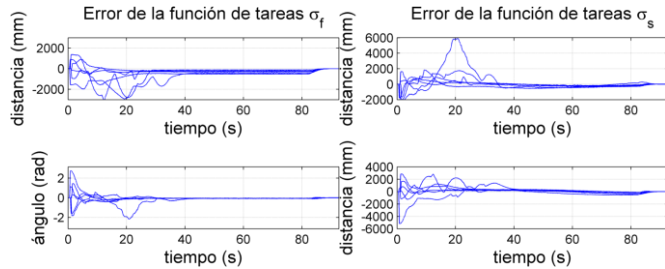


Figura 6. Error de las funciones de tareas σ_f y σ_s .

Los valores instantáneos de los componentes de las matrices de ganancias Λ_f y Λ_s , de los seis seguidores, se muestran en la gráfica de la figura 7. Los cambios observados en estas gráficas son resultado de los sistemas difusos descritos previamente.

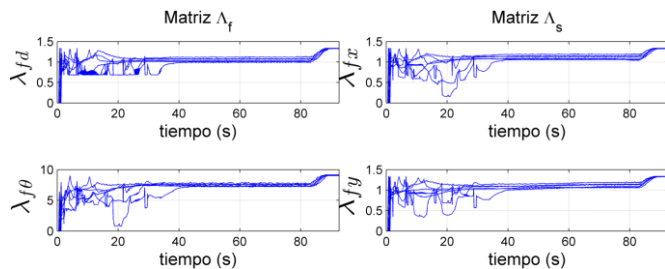


Figura 7. Componentes de las matrices Λ_f y Λ_s .

En la figura 8 se presentan las gráficas de los errores de posición de los robots seguidores. Las posiciones iniciales son aleatorias. Conforme transcurre el tiempo, los errores

convergen a 2m, que es la distancia deseada entre el líder y el seguidor.

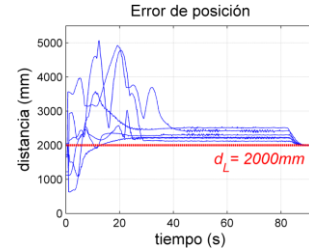


Figura 8. Error de posición de los robots seguidores.

6. CONCLUSIONES

El diseño de las funciones de tareas controla a un grupo de robots para mantener una formación líder seguidor.

El control por comportamientos basado en espacio nulo (NSB), extendido para ser utilizado en robots no-holónicos, es regulado mediante lógica difusa para evitar la saturación de los motores que mueven las ruedas.

Los resultados de la simulación demuestran la efectividad del diseño. El trabajo futuro es la implementación de este control de formación líder seguidor en robots Pioneer.

Agradecimiento

Se agradece al Conacyt por el otorgamiento de una beca para estudios de posgrado.

7. REFERENCIAS.

- [1] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, and M. Tosques, "Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints," *Automatica*, vol. 44., no. 5, pp. 1343-1349, May, 2008.
- [2] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, "Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective," IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Belgium, Tech. Rep. TR/IRIDIA/2012-014, Dec. 2012.
- [3] F. Arrichiello, S. Chiaverini, G. Indiveri, and P. Pedone, "The Null-Space-based Behavioral Control for Mobile Robots with Velocity Actuator Saturations," *Int. J. Robotics Research*, vol. 29, no. 10, pp. 1317-1337, Sep. 2010.
- [4] B. E. Bishop, "On the Use of Redundant Manipulator Techniques for Control of Platoons of Cooperating Robotic Vehicles," *IEEE Trans. Syst., Man and Cyb. (A)*, vol. 33, no 5, pp. 608-615, Sep. 2003.
- [5] G. Antonelli, F. Arrichiello, and S. Chiaverini, "The NSB control: a behavior-based approach for multi-robot systems," *Paladyn, J. Behavioral Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 48-56, Mar. 2010.
- [6] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, "Introduction to Autonomous Mobile Robots," 2nd ed., Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 2011.
- [7] M. G. Marcos, J. A. Tenreiro-Machado, and T. P. Azevedo-Perdicoulis, "A multi-objective approach for the motion planning of redundant manipulators," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 2 pp. 589-599, Nov. 2011.
- [8] Adept Mobile Robots, (2014, Nov.) "Aria," Disponible en: <http://robots.mobilerobots.com/wiki/ARIA>.
- [9] Arrichiello, F., Chiaverini, S., Indiveri, G. and Pedone, P., The null-space-based behavioral control for mobile robots with velocity actuator saturations, *Int. J. of Rob. Research.*, vol. 29, no. 10, 2010, pp. 1317-1337.
- [10] Takagi, T. and Sugeno, M., Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 15, 1985, pp. 116-132.