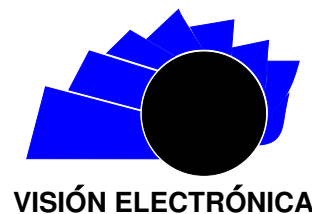




Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index>



VISIÓN INVESTIGADORA

La teoría evolutiva como solución al control de formación

Evolutionary theory as solution to the formation control

Sandra M. Guzman H.¹, Eduardo Mojica-Nava.²

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: Enero de 2015

Recibido: Enero de 2015

Aceptado: Febrero de 2015

Palabras clave:

Control de formación
robótica móvil
sistemas multi-agente

RESUMEN

Se presenta un control de formación para múltiples Vehículos Submarinos Autónomos con estructura de tipo líder-seguidor. El controlador se modela como un sistema multi-agente representado por un dígrafo compuesto por vértices y aristas que simbolizan los agentes (vehículos) y el sistema de comunicación, respectivamente. Se empleó la matriz Laplaciana compleja del dígrafo, para calcular la formación geométrica y enseguida se evalúa la respuesta de consenso de la formación utilizando la teoría evolutiva dinámica del replicador-mutador. Finalmente, se integran las dos respuestas y se calcula la posición de cada agente seguidor. Las simulaciones muestran que combinando estas dos teorías se puede garantizar una perfecta formación geométrica en todo momento y que se pueden emplear un sinnúmero de agentes en la estructura.

ABSTRACT

This article shows the research results to design a formation control to multiple autonomous submarine vehicles with a structure type tracker-leader. The controller is modeled as a multi-agent system represented by a diagraph composed by vertices and edges that represent the agents (vehicles) and the communication system, respectively. It is used the complex Laplacian matrix of the diagraph to calculate the geometric formation, and immediately is evaluated the consensus response of the formation using the dynamic theory of the mutator – replicator. Finally, it integrates both responses and it calculates the position of each tracker agent. The simulations show that combining these theories can be guaranteed a perfect geometric formation all the time and also can be used any number of agents in the structure.



Keywords:

Formation control
Mobil robotics
Multiagent systems.

¹Ingeniera Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Católica de Colombia, Colombia; magíster en Ingeniería - Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Correo electrónico: smguzmanh@unal.edu.co

²Ingeniero Electrónico, UIS, Colombia; magíster en Ingeniería Electrónica, Universidad de Los Andes, Colombia; doctor en Ingeniería, Universidad de Los Andes, Colombia, PhD., Ecole des Mines de Nantes, Francia. Profesor Asociado: Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Correo electrónico: eamojican@unal.edu.co

1. Introducción

Un grupo de múltiples Vehículos Submarinos Autónomos (AUV, autonomous underwater vehicle, por sus siglas en inglés) proporcionan flexibilidad, robustez y eficiencia, más allá de lo posible con un solo AUV; además, permite estudiar grandes áreas oceánicas de una manera más rápida y económica [1]. La coordinación de los AUV mejora la exploración marina e incrementa los resultados de las diferentes aplicaciones bajo el agua [2].

Las flotillas de AUV se construyen como sistemas distribuidos; aunque su diseño se convierte en un reto debido a que los AUV poseen una capacidad de percepción y comunicación limitada. Además, el uso y la coordinación de múltiples vehículos tienden a aumentar la complejidad de las comunicaciones. A fin de mitigar los inconvenientes mencionados, hasta cierto punto, se emplean los sistemas multi-agente [3].

Diferentes autores han sugerido la definición de un sistema multi-agente, uno de ellos propone que se encuentran compuestos por elementos computacionales que poseen acción autónoma, y que son capaces de interactuar entre sí, no solo para el intercambio de mensajes, sino también para un tipo más elaborado que se asemeja a la actividad social (cooperación, coordinación, negociación, etc.) [4]. Puede definirse también como una estructura manipuladora distribuida que tiene varios agentes [5]. Sistemas que inicialmente se centraban en la estructuración organizativa y protocolos de negociación [6]. Sin embargo, la coordinación descentralizada de los sistemas multi-agente se ha convertido en un área activa de investigación y ha atraído mucho interés de diversas disciplinas, incluyendo el comportamiento animal, la teoría de control, la biofísica, ciencias sociales y ciencias de la computación [7]. La tecnología de los sistemas multi-agente con muchos tipos de robots submarinos tiene un amplio campo en futuras investigaciones bajo el agua. Por ejemplo, en campos como la investigación de contaminación de agua, control de la acuicultura, o la investigación de los arrecifes de coral [8] [9].

Un agente es un sistema informático, que tiene la capacidad de comportarse de forma automática con el fin de lograr un objetivo durante el proceso de diseño [5]. Wooldridge y Jennings [10] señalan que las propiedades de un agente son: autonomía, habilidad social, reactivo y proactivo. Los agentes también se pueden caracterizar por el hecho de ser benevolentes (cooperativos) o competitivos [11]. La organización los agentes involucra el desarrollo de la coordinación en actividades de cooperación [12]. Es así como dichos agentes pueden utilizar diferentes protocolos y formas de descubrimiento para la coordinación y la comunicación en sus interacciones [13].

La coordinación es una propiedad de un sistema de agentes que realizan alguna actividad en un entorno compartido. El grado de coordinación se da en la medida en que evitan bloqueos, puntos muertos y mantienen de las condiciones de seguridad vigentes. Hay dos tipos de coordinación (cooperación o competencia) que dependen de si el agente es benévolo o competitivo, respectivamente [14]. El control de formación en un sistema multi-agente es un problema de coordinación típico para los AUV cooperativos, que se ha estudiado ampliamente en los últimos años. Un método tradicional para hacer control de formación es la estructura líder-seguidor [15], en donde los agentes líderes cuentan con diferentes equipos de navegación, mientras que los agentes seguidores llevan dispositivos de una precisión relativamente baja.

En [16], se propone un algoritmo de formación tipo líder-seguidor, basado en una función potencial artificial que evita colisiones entre los vehículos. Aunque es difícil mantener una formación geométrica, en tanto fue diseñado solo para seguir un camino. El algoritmo propuesto en [17] mantiene una formación geométrica en una, dos o tres dimensiones, sin ningún cambio en la ley de control. Además, se puede ampliar para incluir un gran número de vehículos. Sin embargo, el sistema de navegación limita el número máximo de vehículos en una formación. En [16], se estudia una estrategia que mantiene la formación triangular deseada. El líder puede ir a través de la ruta asignada y los seguidores se adaptan a su propio ritmo a lo largo de la distancia de la trayectoria del líder; aunque el sistema no puede evaluarse contra posibles colisiones dentro de la formación.

En resumen, los principales problemas se presentan cuando se añaden vehículos y se mantiene una forma geométrica, ya que provoca un aumento en el tiempo de convergencia y genera potenciales colisiones entre los vehículos. Una posible solución es garantizar que los vehículos lleguen a un acuerdo de su posición dentro de la formación geométrica, es decir, que los agentes lleguen a un consenso [15].

Teniendo en cuenta las mencionadas dificultades, se propone un nuevo método para resolver el problema del control de formación de un sistema multi-agente con estructura líder-seguidor, a partir del consenso con el fin de modificar el tiempo de convergencia y mantener una formación geométrica en todo momento. El artículo se divide en cuatro secciones: en la segunda se encuentran la descripción del control de formación propuesto, en el que emplea una técnica evolutiva; en la tercera los resultados de simulación en el seguimiento de varias trayectorias con diferentes formaciones; y en la cuarta las conclusiones y el trabajo futuro.

2. Control de formación de vehículos submarinos autónomos

El sistema multi-agente con el que se modela la formación de los vehículos está integrado por múltiples AUV; es decir, que un agente es un Vehículo Submarino Autónomo. El control de formación propuesto es del tipo líder-seguidor. Por lo tanto, hay dos clases de agentes uno que se comporta como líder y otro como seguidor.

2.1. Agente líder

El agente líder es uno de los vehículos que encabeza la formación y es el encargado de señalar la ruta por donde deba moverse el sistema. Se considera que es un vehículo que cuenta con un sistema de comunicación que puede enviar a los vehículos seguidores las coordenadas de su ubicación. La principal tarea del líder es dirigir la expedición, entonces se asume que posee un sistema de navegación y un sistema sensorial para determinar los posibles obstáculos dentro de una determinada trayectoria. El vehículo puede tener predeterminada una trayectoria a seguir o podrá encontrarla autónomamente.

El sistema multiagente se modelará como un dígrafo que se define como $(G; E)$, en donde V corresponde a los vértices del grafo y que representa a un agente del sistema. E son las aristas que unen a los vértices y que se toma como el sistema de comunicación entre los agentes. Como se trata de un dígrafo la orientación de las aristas indica el sentido en el que se envía la comunicación. Por lo tanto, un agente líder no tendrá en el grafo una arista con una orientación hacia él porque el vehículo no se preocupa por la posición de sus seguidores, ni recibe información de ningún otro agente.

2.2. Agente seguidor

El agente seguidor corresponde al vehículo submarino autónomo encargado de cumplir la formación geométrica. Se asume que el vehículo tiene un sistema de comunicación que le permite recibir la información de la ubicación de los líderes y que además le brinda la capacidad de enviar las coordenadas de su posición a los demás vehículos seguidores. Al igual que el agente líder, el seguidor se representa como un vértice en el grafo y su sistema de comunicación será la arista. La diferencia con el líder radica en el sistema de navegación y de comunicación.

Teniendo en cuenta la anterior descripción, el agente seguidor debe tener por lo menos una conexión que provenga de un vehículo líder y otra de un vehículo seguidor. Esto le permitirá mantener el estado relativo de su posición con respecto al líder y al seguidor con el que se comunique.

2.3. Control de formación del modelo multi-agente

Se considera que el consenso es el acuerdo establecido entre los agentes para lograr una formación geométrica en donde el objetivo es alcanzar un estado de acuerdo mutuo entre los vehículos. Se propone que los agentes líderes determinan la trayectoria y los agentes seguidores realizan la formación geométrica, con respecto a la posición de los líderes. El enfoque de consenso empleado se basa en la teoría de juegos evolutiva (dinámica del replicador-mutador) [18]. Esta teoría fue propuesta en primer lugar por Taylor y Jonker en [18] y describe la evolución de las frecuencias de las estrategias en una población. En 2002, un importante estudio realizado por Page y Nowak [19] combinan la mutación con la dinámica del replicador, en la que se considera una frecuencia de selección y mutación.

La topología del sistema multi-agente propuesto se representa por un dígrafo, donde los agentes son los nodos y los bordes simbolizan la infraestructura de comunicación. Se considera como una población evolutiva dinámica que se puede modelar como un juego evolutivo, donde los agentes son las estrategias. Entonces, se supone que una estrategia puede ser replicada o mutada.

La replicación o la mutación dependen de la fuerza de mutación μ . Si $\mu = 0$ significa que es una réplica perfecta y si $\mu = 1$ es una mutación perfecta. El control de formación propuesto reúne todas las probabilidades en una matriz llamada $Q = q_{ij}$ y sus entradas satisfacen la condición de $\sum_j q_{ij} = 1$. La probabilidad q_{ij} se puede escribir en términos del valor de la mutación, que viene dada por [20]:

$$q_{ij} = \frac{\mu}{N-1}, \text{ para } i \neq j$$

$$q_{ij} = 1 - \mu, \text{ para } i = j$$

En donde, N son las distintas estrategias S_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Cada estrategia tiene una frecuencia $x \in [0, 1]$. Además, se debe cumplir que $\sum_{i=1}^N x_i = 1$. Entonces el vector de distribución de la población sería $x = [x_1, \dots, x_N]^T$. El equilibrio se obtendría cuando las frecuencias empleadas por los seguidores sean iguales, pues en el juego todos tendrían la misma probabilidad de ganar. Dado que los líderes no reciben información de ningún agente sus frecuencias deben ser cero. La matriz de pagos B (1) corresponde a los valores de cada posible confrontación y tiene en cuenta los beneficios por ganar y los costos invertidos. Dicha matriz estará dada por:

$$B = [b_{ij}] \in R^{N \times N} \quad (1)$$

en donde b_{ij} es el costo por cambiar de la estrategia i a la estrategia j . Se considera que la matriz de pagos está dada por la matriz Laplaciana normalizada de la

formación líder-seguidor, es decir que cada nodo es una estrategia S_i . Se supone que el pago total en el juego es una función de adaptación (*fitness*) que mide el éxito evolutivo y depende de la frecuencia del comportamiento de la población. La evolución óptima de la formación resulta cuando hay un balance entre los beneficios y los costos, es decir que se maximice dicha función [21]. La función *fitness* F_i de los agentes con estrategia S_i está dada por

$$F_i = \sum_{k=1}^N b_{ik} x_k$$

La función *fitness* total es $F = [F_1, \dots, F_n]^T$. Para los líderes la función debe ser cero, porque ellos no reciben información de los seguidores y no tienen una frecuencia asociada. El promedio de la población se obtiene multiplicando la función total por el vector de las estrategias, está dado por

$$\phi = F^T x$$

donde x es el estado o estrategia empleada y ϕ es el promedio de la adaptación. En donde el consenso se alcanzaría cuando las funciones *fitness* sean todas iguales al promedio de la adaptación. Por último, la ecuación de la dinámica del replicador-mutador está dada por

$$\dot{x}_i = \sum_j^N x_j F_j(x) q_{ij} - x_i \phi \quad (2)$$

La ecuación 2 se soluciona y la respuesta corresponde a la evolución de las estrategias. El resultado obtenido se combina con la matriz Laplaciana compleja del dígrafo que considera N_l co-líderes y N_f agentes seguidores. Para esto, se calculan los pesos complejos del dígrafo que representan las conexiones del grafo de tal manera que $\omega_{ij} \in \mathbb{C}$ para cada borde j, i . La matriz puede definirse como:

$$L_c = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \text{ y } j \notin N_i \\ -\omega_{ij} & \text{si } i \neq j \text{ y } j \in N_i \\ \sum_{j \in N_i} -\omega_{ij} & \text{si } i = j \end{cases}$$

La matriz Laplaciana compleja debe tener la siguiente forma:

$$L_c = \begin{bmatrix} 0_{(N_l \times N_l)} & 0_{(N_l \times N_f)} \\ L_{fl}(N_f \times N_l) & L_{ff}(N_f \times N_f) \end{bmatrix},$$

en $L_{fl}(N_f \times N_l)$ es la submatriz de interacción de los líderes hacia los seguidores y $L_{ff}(N_f \times N_f)$ la submatriz de interacción entre los seguidores. Teniendo en cuenta que entre los líderes no hay comunicación y que tampoco reciben información de los seguidores, entonces los demás elementos son cero.

Para lograr la formación, primero se determina cuál sería la topología geométrica y cuál la cantidad de vehículos/agentes que integrarán el esquema. Posteriormente, se realizan los cálculos de consenso estableciendo siempre que $\mu=1$ (mutación perfecta). Enseguida se calcula la matriz Laplaciana compleja y se encuentra la posición de los seguidores a partir de las posiciones en un plano complejo que los líderes alcancen estipuladas en el vector columna llamado g_i . El cálculo se realiza empleando la siguiente ecuación:

$$P_f = [-L_{ff}]^{-1} [g_i + L_{lf} P_l], \quad (3)$$

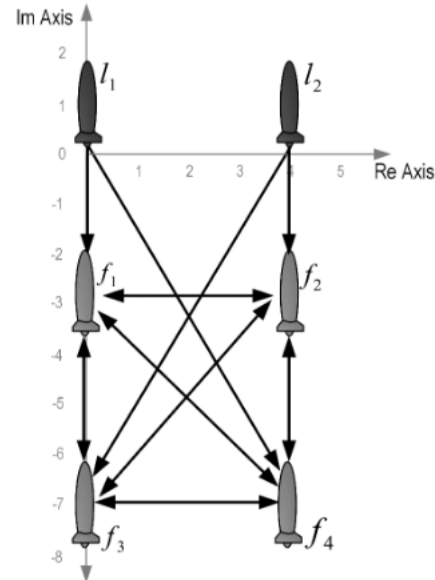
en donde $[-L_{ff}]^{-1}$ es la matriz inversa de $[-L_{ff}]$ y g_i es la solución de (2). El resultado es un vector columna P_f que indica las posiciones de los agentes seguidores.

Ahora bien, en la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos en dos diferentes simulaciones para el control de formación propuesto y se compara el primer resultado con el control de formación realizado con el Laplaciano complejo [22].

3. Resultados de simulación

El control de formación propuesto se simuló en Matlab®. Para el primer caso se empleó la topología presentada en la Figura 1. Los líderes están marcados con l_1 y l_2 y los seguidores como f_1, f_2, f_3 y f_4 .

Figura 1: Topología con seis agentes



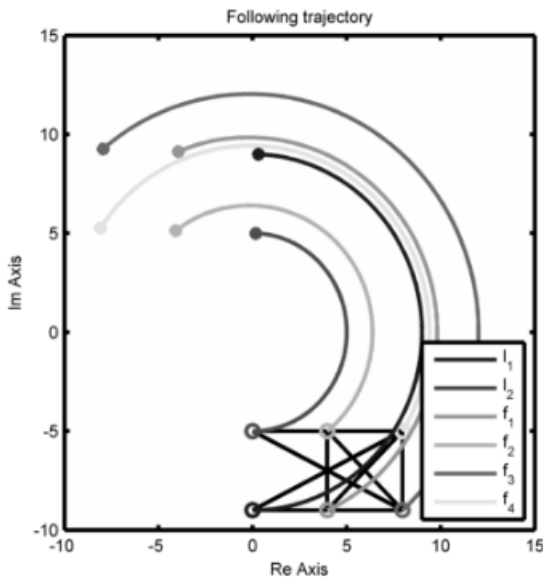
Fuente: elaboración propia.

El Laplaciano complejo de la formación está dado por:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2,5 - 0,5i & -1 & -1 & 0,5 + 0,5i \\ 0 & -1 & -1 & 3 + 2i & -1 & -2i \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 1 - 2i & 2i \\ -1 & 0 & 1 & -1 & -2i & 1 + 2i \end{bmatrix}$$

Con $\mu = 1$ se obtiene la matriz Q y posteriormente se calculan las frecuencias de las estrategias, quedando como $x = [0 \ 0 \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4} \ \frac{1}{4}]^T$. Entonces la función *fitness* total se expresa $F_T = [0 \ 0 \ \frac{1}{16} \ \frac{1}{16} \ \frac{1}{16} \ \frac{1}{16}]^T$. Por lo tanto, el promedio de la población sería $\phi = \frac{1}{64}$. Luego se calculan las posiciones de los seguidores. En la Figura 2 se muestra el resultado obtenido para el seguimiento de una trayectoria en el plano complejo de medio arco de circunferencia.

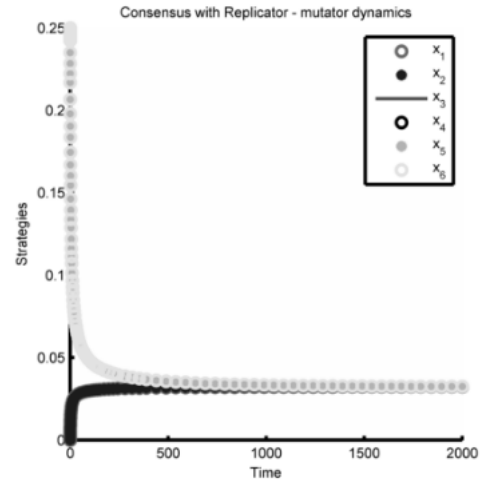
Figura 2: Trayectoria con seis agentes empleando replicator-mutator



Fuente: elaboración propia.

La respuesta (Figura 2) permite determinar que la propuesta del control de formación garantiza que los vehículos no se chocan mientras buscan su ubicación y que la formación geométrica se mantiene durante el recorrido. El análisis de la respuesta de consenso (Figura 3) muestra que los agentes llegan al consenso en $\phi = \frac{1}{64}$, tal y como se calculó previamente.

Figura 3: Resultado del consenso en la formación

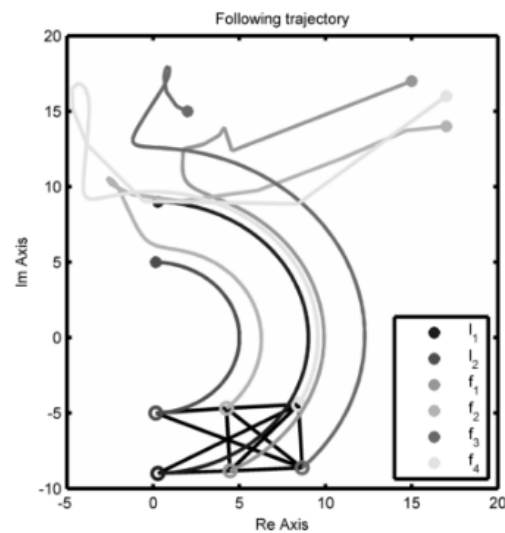


Fuente: elaboración propia.

El control de formación se comparó con el modelo del Laplaciano complejo propuesto en [12]. Las posiciones iniciales de los seguidores se asignan aleatoriamente en un rango comprendido entre $12i$ y $5 + 16i$. La trayectoria de los líderes corresponde al mismo medio arco de circunferencia simulado anteriormente.

La respuesta (Figura 4) muestra que al inicio del recorrido no puede garantizarse que los vehículos no choquen entre ellos. Aunque una vez se establece la formación geométrica se mantiene.

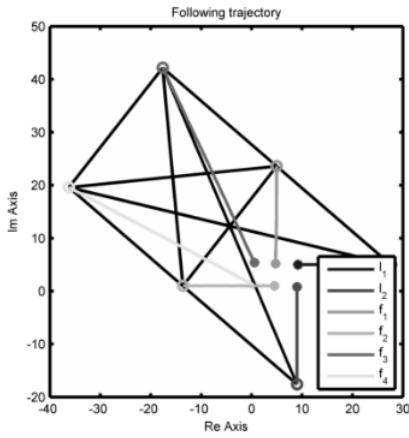
Figura 4: Trayectoria con seis agentes empleando el Laplaciano complejo



Fuente: elaboración propia.

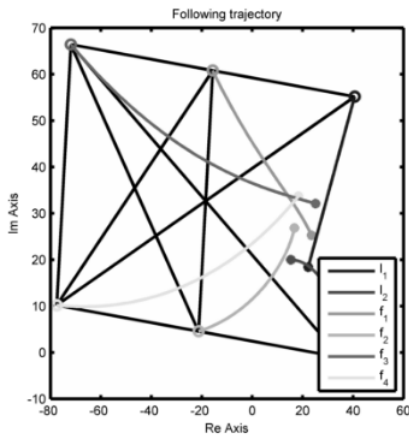
En la siguiente simulación se realizó el seguimiento a una trayectoria en donde los líderes no trazan un recorrido similar. Es decir, que el primer líder tiene predeterminada una línea recta creciendo en el eje real, su posición inicial es $9 + 5i$ y el segundo líder recorre una línea recta, aunque creciendo hacia la parte negativa del eje imaginario, su posición inicial es $9 + i$. Los resultados se presentan en la Figura 5. Las posiciones iniciales se trazan con asteriscos y las finales con un círculo. Se observa que, aunque los líderes no vayan en sentidos iguales, la formación no se pierde y los seguidores buscan el recorrido que se ajuste proporcionalmente al movimiento de los líderes.

Figura 5: Trayectoria no uniforme para los líderes empleando replicator-mutator



Fuente: elaboración propia.

Figura 6: Segunda trayectoria no uniforme para los líderes empleando replicator mutator

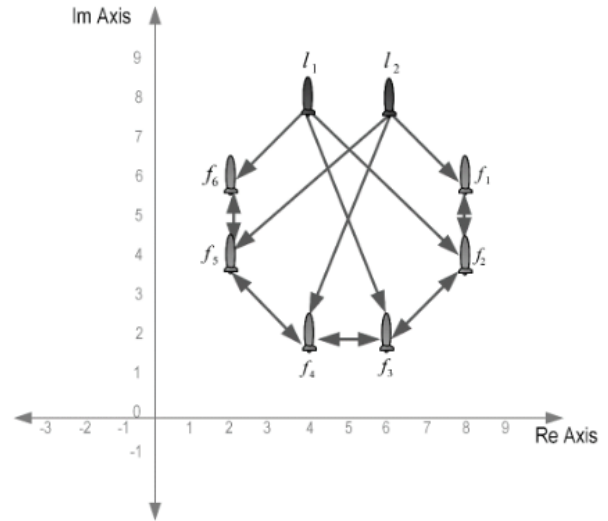


Fuente: elaboración propia.

Se realizó una segunda trayectoria en donde el primer líder describe la recta $y = 2xi + 13$ con x iniciando en 9. En el segundo agente se colocó una trayectoria de medio arco de circunferencia con radio de 20 e iniciando en la posición $(15; 20i)$. El resultado (Figura 6) es similar al anterior caso. Es decir que los agentes seguidores no rompen la formación. Aunque, debido a las trayectorias distintas de los líderes ellos, se alejan para lograr la convergencia en la formación geométrica. Lo anterior, muestra que si las posiciones de los co-líderes tienen cruces podrán ocasionar un choque entre los vehículos seguidores porque tienden a garantizar la formación geométrica con respecto a todos los co-líderes y no a uno solo.

Una segunda simulación se realizó incluyendo ocho agentes de los cuales dos son co-líderes f_1 y f_2 y los demás seguidores ($l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$). La topología que se propone se muestra en la Figura 7.

Figura 7: Topología con ocho agente



Fuente: elaboración propia.

A partir de la topología se calcula la matriz Laplaciana compleja y se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -24 + 2i & -2i - 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & -2 & 5 + 5i & -1 - 5i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & -2 & 4 + 8i & -8i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & -2 & 3 + 5i & 1 - 5i & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & -2 & -2 & 2 + 6i & 2 - 6i & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 + 2i & 4 - 2i & 0 \end{bmatrix}$$

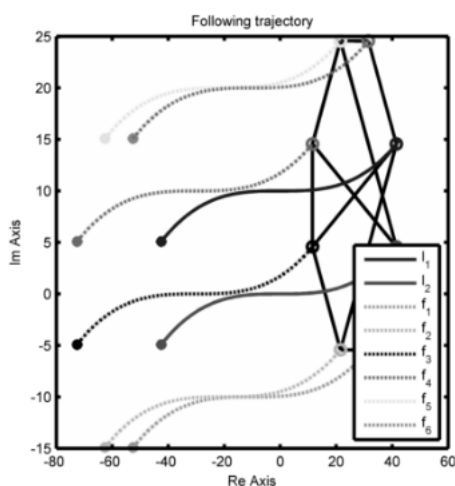
Las frecuencias de las estrategias quedarían denotadas como $x = [0 \ 0 \ \frac{1}{6} \ \frac{1}{6} \ \frac{1}{6} \ \frac{1}{6} \ \frac{1}{6} \ \frac{1}{6}]^T$. Entonces la función *fitness* total se expresa como:

$$F_T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{72} & \frac{1}{108} & \frac{1}{108} & \frac{1}{108} & \frac{1}{108} & \frac{1}{72} \end{bmatrix}$$

con la respuesta se calculan las posiciones de los líderes y de los seguidores.

En la Figura 8 se presenta el resultado obtenido siguiendo una trayectoria parabólica cúbica. La respuesta muestra que no hay choques entre los vehículos y que la formación geométrica se mantiene durante todo el recorrido. Lo anterior se debe a la garantía que brinda el consenso aplicando la dinámica del replicador- mutador a la formación.

Figura 8: Trayectoria con ocho agentes empleando replicador-mutador



Fuente: elaboración propia.

Con la última simulación se puede verificar que el algoritmo se puede aplicar cambiando tanto la cantidad de vehículos como el tipo de trayectoria. Además, se analiza que hay coordinación entre los agentes seguidores desde el inicio de recorrido, de tal manera que los líderes pueden moverse libremente y la formación geométrica se mantiene.

4. Conclusiones

El sistema multi-agente propuesto se modeló con un dígrafo que representa el sistema de comunicación. Se diseñó un control de formación tipo líder-seguidor en donde diferentes agentes son co-líderes y otros vehículos son seguidores. El sistema multi-agente sigue una topología fija utilizando teoría de grafos específicamente el Laplaciano complejo. Para garantizar que los vehículos no se chocaran al inicio de la trayectoria se propuso un control de formación que se basa en una teoría

evolutiva (la dinámica del replicador-mutador), porque se consideró que el sistema era evolutivo y el modelo se estableció empleando teoría de juegos evolutivos. Dicha técnica permite manipular el consenso entre los agentes para posteriormente llegar a la formación.

La ley de control de formación propuesta se comparó con el modelo del Laplaciano complejo. La respuesta mostró que el controlador puede emplearse para cualquier cantidad de vehículos y se puede utilizar en diferentes trayectorias sin modificar la ley.

El enfoque se basa en la dinámica del replicador-mutador y el sistema se modela como un dígrafo. El algoritmo se puede utilizar para dirigir la formación y llegar a un consenso asegurando un tiempo de convergencia más rápido en una formación líder-seguidor. Además, permite evitar posibles colisiones entre los seguidores y facilita cualquier formación geométrica. Aunque su desventaja es que las trayectorias de los líderes deben ser similares para que no ocurra un choque entre los seguidores.

Dando continuidad al desarrollo elaborado se propone aplicar el control de formación a cualquier tipo de robot. Se espera que se exploren aplicaciones en otros agentes. Por otra parte, se propone realizar demostraciones matemáticas que permitan medir el tiempo de convergencia del modelo del control de formación.

5. Reconocimientos

Los autores quieren agradecer a la Dirección Nacional de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia por su soporte en este proyecto.

Referencias

- [1] X. Xiang, G. Xu, Q. Zhang, Z. Xiao and X. Huang, "Coordinated Control for Multi- AUV System Based on Hybrid Automata". Proceeding of the 2007 IEEE International conference on Robotics and Biomimetics, December 15-18, 2007.
- [2] E. Fiorelli, N.E. Leonard, P. Bhatta, D. Paley, R. Bachmayer and D.M. Fratantoni, "Multi-AUV Control and Adaptive sampling in Monterrey Bay" *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol.31, no. 4, pp. 935-948, 2006.
- [3] L. Paull S.G. Saeedi, M. Seto and H. Li, "A Multi-agent Framework with MOOSivP for Autonomous Underwater Vehicles with Sidescan Sonar Sensors" M. AIS 2011, LNAI 6752, pp. 41-50, 2011.

- [4] D. Floroian and F. Moldoveanu, "Using robosmith for multiagent robotic system". *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*, vol. 13, no 52, pp. 227-236, 2010.
- [5] Y. Xu, L. Wang, G. Xia and J. Xie, "System modeling and simulation research for excavation of earth- rock work based on the Theory of Multi-Agent". *First International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2009. ETCS'09. First International Workshop on.* vol 1, pp. 257-261, 2009.
- [6] S. Sen, "Multiagent systems: milestones and new horizons". *Trends in Cognitive Sciences* vol 1, no 9, pp. 334-340, dec, 1997.
- [7] Q. Wu, D. Xue and J. Yao, "Consensus analysis of networked multi-agent systems" *Physics Procedia*, vol 3, pp.1921-1931, 2010
- [8] K. Watanabe, A. and Nakamura, "A design of tiny basin test-bed for AUV Mutli Agent" *Oceans, Proceedings of MTS/IEEE*, pp. 1002-1008, Sep 2005.
- [9] K. Watanabe, "Design and fabrication of a small test-bed aimed for basin experiment of underwater multi-agent system". *Symposium Underwater technology and workshop on scientific use of submarine cables and related technologies, IEEE* pp. 574-580, apr 2007.
- [10] M. Wooldridge and N.R. Jennings, "Intelligent agents: theory and practice". *The Knowledge Engineering Review*, vol. 10, no 2, pp. 115-152, 1995.
- [11] V.R. Lesser, "Cooperative Multiagent Systems: a personal view of the state of the art". *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 11, no. 1, January/February, 1999.
- [12] M. Evans and J. Anderson "Constraint-directed intelligent control in multi-agent problem solving". *AI, Simulation and Planning in High Autonomy systems*, 1990.
- [13] W.C. Regli, I. Mayk, C.J. Dugan, J.B. Kopena, R.N. Lass, J. Modi, J.K. Salvage and E.A. Sultanik, "Development and specification of a reference model for Agent-based systems", *IEEE Transactions on systems, man and Cybernetics. Part C. Applications and Reviews*, vol. 39, no. 5, sept, 2009.
- [14] M.N. Huhns and L.M. Stephens, "2 Multiagent systems and societies of agents". 1999.
- [15] W. Yu, G. Chen, M. Cao, "Distributed leader-follower flocking control for multi-agent dynamical systems with time-varying velocities". *Systems & Control Letters*, vol 59, no. 9, pp. 543-552, sept, 2010.
- [16] X. Xiang, B. Jouvencel and O. Parodi, "Coordinated Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Pipeline Inspection". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 75-84, mar, 2010.
- [17] D.B. Edwards, T.A. Bean, D.L. Odell and M.J. Anderson, "A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations". *IEEE/OES, Autonomous Underwater Vehicles*, vol. 1, pp. 1-6, 2004.
- [18] P. Taylor and L. Jonker, "Evolutionary stable strategies and game dynamics". *Mathematical Biosciences*, vol. 40, no. 1-2, pp.145-156, jul, 1978.
- [19] K. Page and M. Nowak, "Unifying evolutionary dynamics". *Journal of Theoretical Biology*, vol. 219, no. 1, pp.. 93-98, nov, 2002.
- [20] D. Pais, and N. Leonard, "Limit cycles in replicator-mutator network dynamics". *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, pp. 3922-3927, 2011
- [21] E. Mojica-Nava, C. Macana and N. Quijano, "Dynamic population games for optimal dispatch on hierarchical microgrid control". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 44, no. 3, pp. 306-317, mar, 2014.
- [22] Z. Lin, W. Ding, G. Yan, A. Guia, "Leader-follower formation via complex Laplacian". *Automatica*, vol. 49, no. 6, pp. 1900-1906, jun, 2013.