

RESEARCH ON APPLICATION OF ATTRACTIVE AND REPULSIVE FUNCTIONS FOR FUZZY CONTROLLER TO CONTROL SWARMING BEHAVIOR, SEARCHING FOR PREY OF SWARM ROBOT

Pham Van Huy

University of Economics and Industrial Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 17/4/2025	The research problem is to build a simple but effective control algorithm that allows swarm robots to maintain coordination in movement and perform well in the task of finding targets. The research models the interaction forces between robots with each other and with the surrounding environment using an attraction function, in which the attraction helps maintain the formation and aim at the target, while the repulsion helps avoid collisions and disperse when necessary. This input information is fed into a fuzzy controller to determine the velocity and direction of movement for each robot. The control model is evaluated through simulation on Matlab with specific scenarios: moving in a swarm, avoiding obstacles and converging at the bait location. The proposed algorithm allows the robots to maintain a stable formation structure during movement and disperse reasonably when searching for targets. The simulation results show that the robots are capable of converging accurately at the bait location with small positioning errors, short convergence time and low collision levels. The integration of the repulsive force model into the fuzzy controller shows the ability to effectively simulate swarming and prey-seeking behaviors of swarm robots. The research results open up application directions in search and rescue in complex and constantly changing environments.
Revised: 14/6/2025	
Published: 15/6/2025	
KEYWORDS	
Swarm robots	
Repulsion functions	
Swarming	
Search	
Fuzzy control	

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG HÀM HÚT ĐẨY CHO BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ ĐIỀU KHIỂN HÀNH VI TỤ BẦY, TÌM KIẾM MỒI ROBOT BẦY ĐÀN

Phạm Văn Huy

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 17/4/2025	Vấn đề nghiên cứu đặt ra là để xây dựng một thuật toán điều khiển đơn giản nhưng hiệu quả, cho phép robot bầy đàn vừa duy trì được sự phối hợp trong di chuyển, vừa thực hiện tốt nhiệm vụ tìm kiếm mục tiêu. Nghiên cứu tiến hành mô hình hóa các lực tương tác giữa robot với nhau và với môi trường xung quanh bằng hàm hút đẩy, trong đó lực hút giúp duy trì đội hình và hướng đến mục tiêu, còn lực đẩy hỗ trợ tránh va chạm và phân tán khi cần thiết. Các thông tin đầu vào này được đưa vào bộ điều khiển mờ để xác định vận tốc và hướng di chuyển cho từng robot. Mô hình điều khiển được đánh giá thông qua mô phỏng trên Matlab với các kịch bản cụ thể: di chuyển theo đàn, tránh chướng ngại vật và hội tụ tại vị trí có mồi. Thuật toán đề xuất cho phép các robot duy trì được cấu trúc đội hình ổn định trong quá trình di chuyển và phân tán hợp lý khi tìm kiếm mục tiêu. Kết quả mô phỏng cho thấy các robot có khả năng hội tụ chính xác tại vị trí mồi với sai số định vị nhỏ, thời gian hội tụ ngắn và mức độ va chạm thấp. Việc ứng dụng mô hình lực hút đẩy vào bộ điều khiển mờ cho thấy khả năng mô phỏng hiệu quả các hành vi tụ bầy, tìm kiếm mồi robot bầy đàn. Kết quả nghiên cứu mở ra hướng ứng dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trong môi trường phức tạp và thay đổi liên tục.
Ngày hoàn thiện: 14/6/2025	
Ngày đăng: 15/6/2025	
TỪ KHÓA	
Robot bầy đàn	
Hàm hút đẩy	
Tụ bầy	
Tìm kiếm	
Điều khiển mờ	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12612>

Email: pvduy@uneti.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

220

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Sự phát triển mạnh mẽ công nghệ robot nói chung và robot bầy đàn nói riêng đang được ứng dụng nhiều trong công tác tìm kiếm, cứu nạn [1], [2]; vận chuyển hàng trong kho [3]. Đặc điểm của robot bầy đàn là có một số lượng lớn các robot khá đơn giản để thực hiện nhiệm vụ mà một robot đơn khó có thể thực hiện được hoặc thực hiện không mang lại hiệu quả. Chúng hoạt động dựa trên cơ chế hợp tác trao đổi giữa các cá thể giống hành vi của các loài vật sống thành bầy, đàn như kiến, côn trùng, chim, v.v. Ứng dụng hàm hút đẩy cho bộ điều khiển mờ điều khiển các hành vi tụ bầy, tìm kiếm của robot bầy đàn để nâng cao chất lượng điều khiển ổn định trong robot bầy đàn và khả năng tương tác các cá thể trong bầy với nhau [4].

Với robot bầy đàn, thiết kế các cơ chế điều khiển giúp các robot có thể tự tổ chức và phối hợp với nhau để thực hiện các nhiệm vụ phức tạp là một thách thức quan trọng. Khả năng cảm nhận và chuyển động hữu hạn, cùng với tính dị dưỡng, là những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hành vi của hệ thống bầy đàn [5]. Một trong những phương pháp phổ biến là sử dụng hàm hút đẩy để điều chỉnh hành vi của từng robot trong bầy, dựa trên nguyên lý tự nhiên của các đàn kiến trong môi trường thực tế [6].

Động lực học chất điểm nghiên cứu nguyên nhân làm thay đổi chuyển động. Quan sát và nghiên cứu chuyển động của các vật thể trong tự nhiên, ta thấy các vật thể chỉ có thể chuyển động hoặc thay đổi chuyển động khi chịu tác động của những vật khác. Về cơ học có thể phân các lực thành hai loại: loại thứ nhất gồm các lực xuất hiện khi có tiếp xúc giữa các vật tương tác (lực đàn hồi, lực ma sát, v.v.), loại thứ hai gồm các lực xuất hiện khi các vật tương tác không tiếp xúc với nhau (lực hút, lực đẩy, v.v.) [7]. Trong lĩnh vực robot bầy đàn thì lực tương tác giữa các cá thể trong bầy với nhau thường là lực hút đẩy. Lực này cũng là một vector được đặc trưng bởi bốn yếu tố: điểm đặt, phương, chiều và độ lớn [8]. Trong các hệ thống điều khiển robot bầy đàn, chuyển động của từng cá thể robot thường được mô hình hóa dưới dạng động học chất điểm. Tuy nhiên, các thuật toán điều khiển này chủ yếu chỉ mô tả quỹ đạo chuyển động mà chưa xét đến yếu tố động lực học, tức là nguyên nhân vật lý thực sự gây ra chuyển động, như lực tác động, mômen hay đặc tính truyền động của robot [7].

Bài báo này tập trung vào nghiên cứu ứng dụng hàm hút đẩy cho bộ điều khiển mờ nhằm điều khiển các hành vi tụ bầy, tìm kiếm của robot bầy đàn. Thuật toán đề xuất cho phép các robot duy trì được cấu trúc đội hình ổn định trong quá trình di chuyển và phân tán hợp lý khi tìm kiếm mục tiêu. Bộ điều khiển mờ sử dụng các tập luật logic để xử lý dữ liệu cảm biến và đưa ra quyết định phù hợp, giúp robot tự động thích nghi với các tình huống đa dạng mà không cần sự điều khiển tập trung.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình toán học robot bầy đàn

2.1.1. Động học chất điểm

Một bầy gồm N cá thể chuyển động trong không gian Euclide n chiều. Mỗi cá thể được xem là một chất điểm, bỏ qua kích thước vật lý. Vị trí của cá thể thứ i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) được biểu diễn bởi vectơ $q^i \in \mathbb{R}^n$. Giả sử các cá thể di chuyển đồng thời và không có độ trễ về thời gian. Khi đó, phương trình chuyển động của cá thể thứ i được mô tả bởi [7]:

$$\ddot{q}^i = \sum_{j=1, j \neq i}^N g(q^i - q^j) \quad (1)$$

Trong đó: $\dot{q}^i \in \mathbb{R}^n$ là vận tốc của cá thể i , $g(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ là hàm tương tác thể hiện lực hút đẩy giữa các cá thể. Phương trình (1) được gọi là mô hình động học chất điểm toàn cục, trong đó, mỗi cá thể đều chịu ảnh hưởng của tất cả cá thể còn lại trong bầy. Tuy nhiên, trong thực tế, thứ nhất là mỗi cá thể chỉ có thể cảm nhận thấy các cá thể lân cận mình trong một phạm vi giới hạn nhất định (do giới hạn và cảm biến hoặc truyền thông). Thứ hai là khả năng di chuyển của mỗi cá thể là hữu hạn và bị chi phối bởi các tác động từ các cá thể lân cận. Do đó, mô hình được điều chỉnh thành dạng mô hình động học chất điểm cục bộ [5]:

$$\dot{q}^i = \sum_{j \in R^i} w_{ij} g(q^i - q^j) \quad (2)$$

Trong mô hình bầy đàn, mỗi cá thể chỉ có thể tương tác với các cá thể khác nằm trong phạm vi nhất định, gọi là vùng lân cận. Với cá thể thứ i , vùng lân cận được xác định như sau:

$R^i = \{q^j: \|q^j - q^i\| \leq \gamma; \forall j \in N\}$, γ là bán kính cảm nhận (hay bán kính nhìn thấy) của cá thể, cho phép cá thể i chỉ nhận biết và tương tác với các cá thể j nằm trong phạm vi này, đại diện cho lực tương tác hút đẩy giữa các cá thể trong bầy, nhằm duy trì khoảng cách hợp lý và tạo hành vi tụ bầy. Mức độ tương tác giữa các cá thể được đặc trưng bằng ma trận trọng số $W = [w_{ij}] \in R^{n \times n}$ với $w_{ij} \geq 0$ là ma trận tương tác đặc trưng cho khả năng tương tác của cặp cá thể (i, j) , giả thiết rằng $w_{ij} = w_{ji}$, $w_{ii} = 0$ với $\forall i, j$. Thực tế, thành phần w_{ij} do cấu trúc vật lý của cá thể robot thứ i hoặc khả năng tương thích giữa nó với các cá thể còn lại trong bầy chi phối [7].

Gọi $\sigma(q^i): R^n \rightarrow R$ là đại lượng đặc trưng cho sự chuyển động của các cá thể trong môi trường theo hướng giảm hàm năng lượng, ký hiệu $\nabla_{q^i} \sigma(q^i)$ là gradient của $\sigma(q^i)$ tại điểm q^i [9], [10]. Mô hình bầy đàn có dạng:

$$\dot{q}^i = -\nabla_{q^i} \sigma(q^i) + \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} g(q^i - q^j) \quad (3)$$

$g(\cdot)$ là hàm hút đẩy giữa hai cá thể i, j trong bầy. Ký hiệu $W = [w_{ij}] \in R^{n \times n}$ là ma trận liên kết của bầy, $w_{ij} > 0$ có nghĩa là cá thể i là đối tượng tác động từ cá thể j với cường độ liên kết w_{ij} , $w_{ij} = 0$ có nghĩa rằng không có tác động nào từ cá thể j tới i .

Trong nghiên cứu, mô hình chuyển động tập thể của cá thể i của bầy đàn như sau [9]:

$$\dot{q}^i = -\nabla_{q^i} \sigma(q^i) + \sum_{j=1, j \neq i}^N g(q^i - q^j) \quad (4)$$

Hàm hút đẩy giữa các cá thể robot $g(\cdot)$ là một hàm (đối xứng qua gốc tọa độ), đặc điểm quan trọng của hàm $g(\cdot)$ dẫn đến hành vi tụ bầy của bầy đàn.

2.1.2. Động lực học robot bầy đàn

Mỗi chuyển động của một robot được xem như là chuyển động của một chất điểm trong không gian, phương trình động lực học được miêu tả như sau:

$$\begin{cases} \dot{q}^i = v^i \\ \dot{v}^i = \frac{1}{m} f_i \end{cases}, i = 1, \dots, N \quad (5)$$

Trong đó: $(v^i, q^i) \in R^3$ và vector vị trí, vector vận tốc và khối lượng của robot thứ i trong không gian 3 chiều thuộc m . Các lực tương tác giữa robot i với: cá thể đầu đàn, các robot láng giềng, và với chướng ngại vật được thiết kế điều khiển theo đầu vào hàm f_i . Định luật II Newton: $f_i = m\ddot{q}^i$ tích phân của gia tốc một lần ta được vận tốc, hai lần chúng ta được vị trí, do đó mô hình bầy đàn như (5).

Trong các mô hình toán học của robot bầy đàn đã được nghiên cứu ở trên, mỗi mô hình đều có xét đến yếu tố khác nhau chi phối hành vi hoạt động của bầy đàn như: tầm nhìn, khả năng tương tác giữa các cá thể, nhiễu tác động, khối lượng của các cá thể,...

2.2. Hàm hút đẩy robot bầy đàn

Hàm hút đẩy $g(\cdot)$ trong công thức (1) được xác định như sau [4]:

$$g(q^i - q^j) = -(q^i - q^j) \left[a - b \exp \left(-\frac{\|q^j - q^i\|^2}{c} \right) \right] \quad (6)$$

Trong đó: a, b, c là các hằng số dương và $b > a$, $\|q^j - q^i\|$ là khoảng cách giữa các cá thể i và cá thể j :

$$\|q^j - q^i\| = \sqrt{(q^i - q^j)^T (q^i - q^j)}, (q^i - q^j) \in R^n \quad (7)$$

$g(q^i - q^j)$ là hàm hút nếu khoảng cách giữa các cá thể là lớn, là hàm đẩy nếu khoảng cách này là nhỏ và $g(q^i - q^j) = 0$ khi:

$$\begin{cases} q^i - q^j = 0 \\ \|q^j - q^i\| = \sqrt{c \ln \left(\frac{b}{a}\right)} = \sigma_s^* \end{cases} \quad (8)$$

Theo mô hình bầy đàn như công thức (1), mỗi cá thể trong bầy đàn đều phải thu nhận và trao đổi được vị trí tương đối của các cá thể khác trong bầy. Nhưng trong bầy sinh học thực tế, mỗi cá thể chỉ có thể nhìn thấy các cá thể khác nằm trong phạm vi quan sát của mình, do đó lực hút đẩy chỉ xảy ra đối với các cặp cá thể nhìn thấy nhau, ngoài phạm vi ấy ra, sẽ không tồn tại lực tương tác giữa chúng.

Với mô hình động học (1), hàm hút đẩy (6), các cá thể sẽ di chuyển hội tụ về một khu vực xung quanh tâm bầy [5]:

$$\Omega_c(q^c) = \{q: \|q - q^c\| \leq \sigma^2\} \quad (9)$$

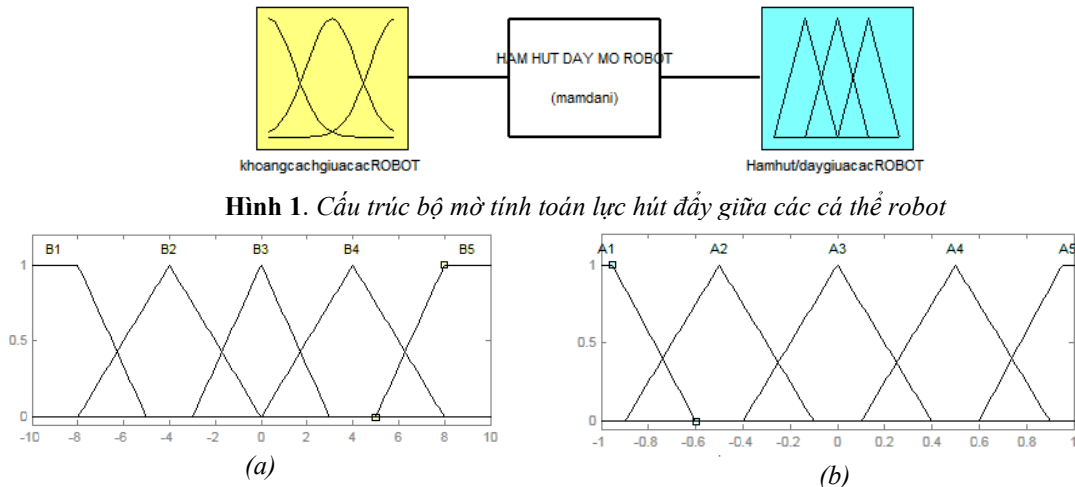
trong đó: $\sigma = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{c}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right)$

L. Wang và H. Fang [5] xây dựng được công thức tính hàm hút đẩy giữa các cá thể (i, j) trong bầy:

$$g(q^i - q^j) = \begin{cases} (q^i - q^j)[a - b \exp\left(-\frac{\|q^i - q^j\|^2}{c}\right)], j \in R^i \\ 0, j \in R^i \end{cases} \quad (10)$$

2.3. Xây dựng hàm hút đẩy mờ

Hàm $f(\cdot)$ là một hàm phi tuyến phụ thuộc vào khoảng cách giữa các robot, do đó có thể tính toán xấp xỉ hàm $f(\cdot)$ dựa vào mô hình mờ Mamdani theo cấu trúc SISO như Hình 1, trong đó tín hiệu vào là $u = \sigma_s - \sigma_s^*$, $u = [-10, 10] \in \mathbb{R}$, chia u ra 5 khoảng B^k như Hình 2a, tín hiệu ra là $A = f(\sigma_s - \sigma_s^*)$ có miền giá trị trong khoảng $[-1, 1]$, được chia ra thành 5 khoảng A^k như Hình 2b.



Hình 2. Hàm liên thuộc tín hiệu đầu vào (a) và tín hiệu đầu ra (b) của bộ mờ $f(u)$

- Thành lập 5 luật có dạng: If $u = B^k$ Then $A = A^k$ với $k=1, 2, \dots, 5$.
- Chọn luật hợp thành MAX-MIN, giải mờ theo phương pháp trung bình trọng số.

2.4. Quá trình hội tụ của robot bầy đàn

1- Khởi tạo thông số: số lượng robot (N); tham số điều khiển: dat, K, deltat; hàm điều khiển f ; khoảng cách an toàn giữa các cá thể robot: $\sigma_s^* = \text{dat}$; khoảng cách thực tế: $\sigma_s = d$; Hàm hút đẩy mờ: $f(\sigma_s - \sigma_s^*) = f$; vận tốc di chuyển của cá thể robot thứ i theo phương x và phương y : deltax^i , deltay^i ; quãng đường di chuyển được phương x và phương y trong 1 bước tính (deltat): Sdeltax^i , Sdeltay^i ; tọa độ sau $k+1$ bước tính $x^i(k+1)$, $y^i(k+1)$.

2- Thiết lập vòng lặp chính: Gán giá trị ban đầu: Đặt $k = 0$ (số vòng lặp); bắt đầu với $i = 1$ (xét từng robot); đặt giá trị $Sdeltax = 0$, $Sdeltay = 0$ (tổng dịch chuyển ban đầu); duyệt từng cặp robot để tính toán lực di chuyển. Bắt đầu vòng lặp với $j = 1$.

- Nếu $j \neq i$ (để tránh tự so sánh với chính nó): Tính khoảng cách thực tế d giữa robot i và robot j ; tính giá trị hàm điều khiển f dựa trên khoảng cách; tính toán $deltax$ và $deltay$ (dịch chuyển tạm thời) và cộng dồn giá trị $Sdeltax$ và $Sdeltay$ để tổng hợp lực di chuyển.

- Tăng j lên 1 và lặp lại cho đến khi $j = N$

3- Cập nhật vị trí robot: Sau khi tính toán lực tác động từ tất cả các robot khác, cập nhật vị trí mới:

$$+ x^i(k+1) = x^i(k) + Sdeltax, x^i(k+1) = x^i(k) + Sdeltax$$

$$+ y^i(k+1) = y^i(k) + Sdeltay, y^i(k+1) = y^i(k) + Sdeltay$$

+ Vẽ quỹ đạo di chuyển của robot.

4- Kiểm tra điều kiện lặp

- Nếu $i < N$, tiếp tục vòng lặp cho robot tiếp theo ($i = i + 1$).

- Nếu $i = N$, kiểm tra số vòng lặp: Nếu $k < K - 1$, tiếp tục vòng lặp với $k = k + 1$. Nếu $k = K - 1$, thuật toán kết thúc.

2.5. Hành vi kiểm môi của robot bầy đàn

Bầy robot gồm N cá thể đang đi tìm kiếm môi, mỗi cá thể được coi như một chất điểm, bỏ qua kích thước và khối lượng của chúng, các cá thể cùng di chuyển một lúc và quá trình truyền thông tin giữa các cá thể trong bầy là không bị chậm trễ. Lúc đó, phương trình động lực học của cá thể thứ i ($i = 1, 2, \dots, N$) được xác định như sau:

$$\dot{q}^i = \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{1i}(\|q^j - q^i\|)(q^j - q^i) + g_{2i}(\|q^g - q^i\|)(q^g - q^i) \quad (11)$$

trong đó: q^i, q^j, q^m lần lượt là tọa độ của cá thể thứ i , thứ j và tọa độ tâm của môi;

Từ (11) ta thấy tổng các lực tác động lên cá thể thứ i bao gồm 2 thành phần: thành phần thứ nhất là tổng các lực hút đẩy giữa các cá thể khác trong bầy tác động lên cá thể thứ i , gọi là $g_{1i}(\cdot)$, đây chính là yếu tố giúp cho robot di chuyển theo bầy; thành phần thứ hai là lực hút từ môi tới cá thể thứ i , gọi là $g_{2i}(\cdot)$, đây là thành phần lực giúp robot tiến tới vị trí đặt môi.

Lực từ môi tới cá thể thứ i :

$$g_{2i}(\|q^g - q^i\|) = \frac{f_{2i}(\|q^g - q^i\|)}{\|q^g - q^i\|} \quad (12)$$

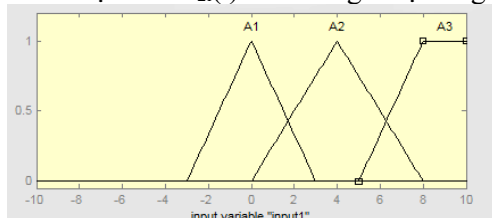
Trong đó: $f_{2i}(\|q^g - q^i\|)$ là lực tương tác giữa môi tới robot.

2.5.1. Bộ điều khiển mờ tính toán lực hút từ môi tới robot

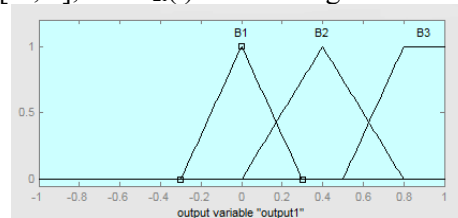
Hàm $f_{2i}(\cdot)$ là một hàm phi tuyến phụ thuộc vào khoảng cách từ môi tới robot, tác giả đã tuyến tính hóa hàm này bằng một bộ điều khiển mờ SISO với luật điều khiển Mamdani:

- Tín hiệu vào u là khoảng cách gần nhất từ môi tới robot, giả sử môi được biểu diễn bằng một hình tròn có tâm q^g và bán kính r , thì $u = \|q^g - q^i\| - r$, u có miền giá trị là khoảng $[-10, 10] \in \mathbb{R}$, chia u ra 3 khoảng A^k như Hình 3a.

- Tín hiệu ra là $f_{2i}(\cdot)$ có miền giá trị trong khoảng $[-1, 1]$, chia $f_{2i}(\cdot)$ ra 3 khoảng như Hình 3b.



(a)



(b)

Hình 3. Hàm liên thuộc tín hiệu đầu vào (a) và tín hiệu đầu ra (b) của bộ mờ $f_{2i}(\cdot)$

- Thành lập 3 luật có dạng:

IF $u = A^k$ THEN $f_{2i}(\|q^g - q^i\| - r) = B^k$

trong đó A^k là trọng số của B^k

- Chọn luật hợp thành MAX-MIN, giải mờ theo phương pháp trung bình trọng số, với $(k = 1, 2, 3)$ ta được luật điều khiển:

$$f_{2i}(\|q^g - q^i\| - r) = \frac{\sum_{k=1}^3 a^k \mu_{A^k}(u)}{\sum_{k=1}^3 \mu_{A^k}(u)} \quad (13)$$

2.5.2. Quá trình tìm kiếm mỗi robot bầy đàn:

1- Khởi tạo vị trí ban đầu của N robot trong tọa độ không gian Euclid 2 chiều:

$$q^1 = \begin{bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \end{bmatrix}, q^2 = \begin{bmatrix} q_1^2 \\ q_2^2 \end{bmatrix}, \dots, q^N = \begin{bmatrix} q_1^N \\ q_2^N \end{bmatrix}$$

2- Tính khoảng cách giữa các robot thứ i và j : $\sigma_s = \sqrt{(q_1^j - q_1^i)^2 + (q_2^j - q_2^i)^2}$

3- So sánh khoảng cách giữa các robot σ_s với khoảng cách an toàn σ_s^* . Nếu:

- $\sigma_s < \sigma_s^*$: robot thứ i phải di chuyển về phía xa robot j .

- $\sigma_s > \sigma_s^*$: robot thứ i phải di chuyển về phía gần robot j .

- $\sigma_s = \sigma_s^*$: robot thứ i giữ nguyên lộ trình đang di chuyển.

Gọi $q^i[k]$, $q^i[k+1]$ lần lượt là vị trí của cá thể robot thứ i sau k và $(k+1)$ bước di chuyển; $q^j[k]$ là vị trí của cá thể robot thứ j sau k bước di chuyển; $v^i[k]$ là vận tốc di chuyển của cá thể i tại bước tính thứ k , Δt là bước tính; $g_{1i}[k]$ là tổng lực tác động lên cá thể i tại bước di chuyển thứ k . Lúc đó, vận tốc di chuyển của cá thể i được xác định theo:

$$v^i[k] = g_{1i}[k] * (q^j[k] - q^i[k])$$

Quãng đường di chuyển tương ứng với một bước tính:

$$\Delta q^i[k+1] = \Delta q^i[k] + v^i[k] * \Delta t$$

Tọa độ mới của cá thể thứ i sau $(k+1)$ bước di chuyển:

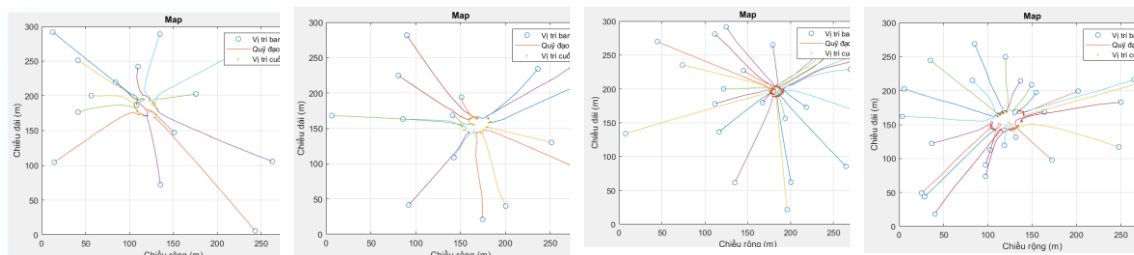
$$q^i[k+1] = q^i[k] + \Delta q^i[k+1]$$

4- Nếu vị trí $q^i[k+1]$ nằm xa khu vực chứa mồi thì cá thể robot phải di chuyển về phía gần mồi nhờ hàm hút $g_{2i}(\cdot)$.

5- Vòng lặp từ bước 2 đến bước 4 được thực hiện cho đến khi các cá thể trong bầy hội tụ và kết thúc K bước di chuyển.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Quá trình hội tụ của robot bầy đàn



(a) $N = 15$, $\sigma_s^* = 15$

(b) $N = 15$, $\sigma_s^* = 25$

(c) $N = 25$, $\sigma_s^* = 15$

(d) $N = 25$, $\sigma_s^* = 30$

Hình 4. Quá trình hội tụ của robot bầy đàn với số lượng robot và khoảng cách an toàn khác nhau

Kết quả được kiểm chứng trên Matlab, các cá thể robot được khởi tạo vị trí ban đầu là ngẫu nhiên trong không gian hai chiều có kích thước $[300, 300]$. Với bộ mờ được thiết kế như mục 2.3

Quá trình di chuyển hội tụ về tâm bầy được thể hiện trên Hình 4, trong đó, số cá thể robot bầy đàn N và khoảng cách an toàn σ_s^* là khác nhau trong mỗi mô phỏng. Hình 4 cho thấy, mặc dù số lượng robot và khoảng cách an toàn thay đổi nhưng các robot đều đạt được kết quả là hội tụ về tâm bầy trong vùng bán kính xác định. Gọi R là bán kính hội tụ thực tế của robot bầy đàn thì R chính

là khoảng cách từ robot gần nhất tới tâm của bầy. Kết quả tính toán các thông số của bầy trong một số trường hợp mô phỏng được trình bày trên Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả tính toán các thông số của quá trình tụ bầy robot bầy đàn

N	σ_s^*	α	β	σ	R
15	15	0,1	8,64	13,56	5,23
	25	0,1	23,27	41,36	15,34
25	15	0,1	7,32	9,25	3,15
	30	0,1	24,34	28,62	14,26

So sánh các kết quả mô phỏng trên Bảng 1 ta thấy:

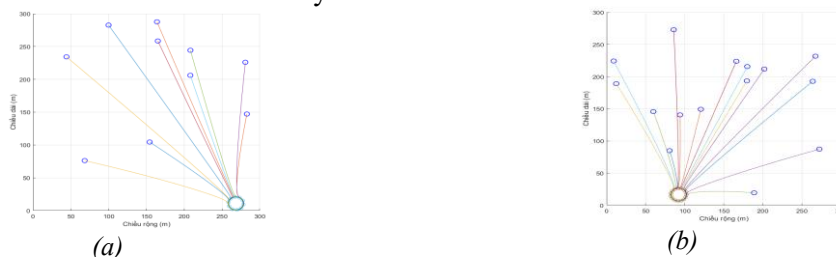
- Khi số lượng cá thể N trong bầy tăng lên thì bán kính hội tụ của bầy sẽ giảm.
- Khi khoảng cách an toàn σ_s^* tăng thì bán kính hội tụ của bầy cũng sẽ tăng.
- Bán kính hội tụ thực tế R luôn nhỏ hơn giá trị tính toán σ .

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng bộ điều khiển mờ tích hợp hàm hút đẩy đã hỗ trợ hiệu quả cho robot bầy đàn trong việc thực hiện đồng thời các hành vi tụ bầy, đảm bảo khoảng cách an toàn với nhau nhờ cơ chế đẩy, đồng thời vẫn hội tụ nhanh chóng về phía mục tiêu nhờ cơ chế hút.

So sánh với các phương pháp không sử dụng điều khiển mờ hoặc không có hàm hút đẩy, mô hình đề xuất thể hiện khả năng hội tụ nhanh hơn, đội hình ổn định hơn và tính thích nghi tốt hơn. Tuy nhiên, trong một số trường hợp mật độ robot cao hoặc môi trường có nhiều vật cản phức tạp, hệ thống cần thêm điều chỉnh tham số của hàm hút đẩy để tối ưu hiệu suất di chuyển.

3.2. Quá trình tìm mồi của robot bầy đàn

Khởi tạo tọa độ ban đầu của các robot trong bầy là ngẫu nhiên, sau đó đặt tọa độ tâm mồi vào môi trường di chuyển của bầy đàn robot. Giả sử mồi có dạng hình tròn và có bán kính r. Kết quả mô phỏng quá trình di chuyển tìm kiếm mồi của các cá thể robot được biểu diễn trên Hình 5, với số lượng robot và bán kính của mồi thay đổi.



Hình 5. Kết quả mô phỏng robot bầy đàn tìm kiếm mồi (a) $N=10$, và (b) $N=15$

Sử dụng bộ logic mờ SISO với luật điều khiển Mamdani để tính toán lực hút đẩy giữa các cá thể robot trong bầy đàn và lực hút từ mồi tới các cá thể robot đã đạt được kết quả: điều khiển robot bầy đàn di chuyển tìm kiếm được mồi.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp ứng dụng hàm hút đẩy vào bộ điều khiển mờ nhằm điều khiển hành vi tụ bầy và tìm kiếm mồi cho hệ thống robot bầy đàn. Việc tích hợp hàm hút đẩy giúp robot có thể duy trì khoảng cách hợp lý với các robot lân cận (tránh va chạm) đồng thời định hướng di chuyển về phía mục tiêu (mồi), từ đó đạt được sự cân bằng giữa hành vi hội tụ và phân tán. Kết quả mô phỏng cho thấy các robot có khả năng hội tụ chính xác tại vị trí mồi với sai số định vị nhỏ, thời gian hội tụ ngắn và mức độ va chạm thấp. Hướng phát triển tiếp theo sẽ là mở rộng mô hình trong môi trường thực tế với các yếu tố không xác định như địa hình thay đổi, nhiễu cảm biến và truyền thông không ổn định; đồng thời tích hợp thêm các thuật toán học máy nhằm tăng khả năng thích nghi và tối ưu hóa hành vi của robot bầy đàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. M. Hereford and M. A. Siebold, "Bio-inspired search strategies for robot swarms," in *Swarm Robotics from Biology to Robotics*, IntechOpen, 2010, doi: 10.5772/8600
- [2] R. D. Arnold, H. Yamaguchi, and T. Tanaka, "Search and rescue with autonomous flying robots through behavior-based cooperative intelligence," *Journal of International Humanitarian Action*, vol. 3, 2018, doi: 10.1186/s41018-018-0045-4.
- [3] Y. D. Liu *et al.*, "A Novel Swarm Robot Simulation Platform for Warehousing Logistics," *International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2017, doi: 10.1109/ROBIO.2017.8324822.
- [4] Y. Liu and K. M. Passino, "Stability Analysis of Swarms in a Noisy Environment," *Proceedings of the 42nd IEEE, Conference on Decision and Control*, 2003, pp.3573-3578.
- [5] L. Wang and H. Fang, "Stability Analysis of Practical Anisotropic Swarms," *11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2010, pp.768-772.
- [6] T. T. N. Le and H. L. Le, "Application of Null Space Based Behavior Control to the Swarm Robot Control," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 5, pp. 97-104, 2015.
- [7] V. Gazi and M. Passino, "Stability Analysis of Swarms," *Proceedings of the American Control Conference*, 2002, pp.1813-1818.
- [8] L. Chaimowicz, M. F. Campos, and V. Kumar, "Dynamic role assignment for cooperative robots," in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, vol. 1, IEEE, 2002, pp. 293–298.
- [9] Z. Xue, J. Zeng, C. Feng, and Z. Liu, "Swarm Target Tracking Collective Behavior Control with Formation Coverage Search Agents & Globally Asymptotically Stable Analysis of Stochastic Swarm," *Journal of Computers*, vol. 6, no. 8, pp.1772-1780, 2011.
- [10] W. Li, "Stability Analysis of Swarms with General Topology," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, vol. 38, no. 4, pp.1084-1097, 2008.