Điều khiển robot bầy đàn tránh vật cản và tìm kiếm mục tiêu

Control swarm robots avoid obstacles and search for goals

Lê Thị Thúy Nga
Trường ĐH GTVT
e-Mail: lethuynga77@gmail.com

Lê Hùng Lân
Viện Ứng dụng Công nghệ - Bộ KHCN
e-Mail: lanlh1960@yahoo.com

Tóm tắt:
Bài báo đề xuất giải pháp điều khiển robot bầy đàn tìm kiếm mục tiêu và tránh vật cản bằng kỹ thuật điều khiển hành vi dựa trên không gian rỗng. Tiếp theo, bài báo dựa trên lý thuyết Lyapunov để đưa ra các điều kiện ổn định của quá trình tụ bầy theo phương thức điều khiển mới đề xuất. Cuối cùng là các kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab chứng minh tính đúng đắn của các nghiên cứu lý thuyết.
Từ khóa: robot bầy đàn, điều khiển hành vi dựa trên không gian rỗng, tránh vật cản, tìm kiếm mục tiêu.

Abstract:
This paper proposes a control solution for searching goal and avoiding obstacles of swarm robots by control technique of Null Space based Behavior. Further more, the article based on Lyapunov theory to give the stable conditions of the swarm convergence under a new control method. Finally, simulation results using Matlab software prove the correctness of the theoretical research.
Keywords: swarm robots, Null Space based Behavior control, avoid obstacles, targeted search.

Chữ viết tắt

PSO	Particle Swarm Optimization
WMR	Wheeled Mobile Robot
NSB	Null Space based Behavior

1. Phần mở đầu

Hệ thống robot bầy đàn luôn gặp phải rất nhiều vấn đề khó khăn, ví dụ như: chúng luôn phải hoạt động trong những môi trường phức tạp, có nhiều trở ngại, nhưng bên cạnh đó khả năng tính toán của chúng lại luôn bị giới hạn bởi các cấu trúc vật lý. Mặc dù vậy, các hệ thống điều khiển vẫn phải đảm bảo trong thời gian thực các robot vẫn phải hoàn thành mục tiêu nhiệm vụ của mình. Trong nghiên cứu [1] nhóm tác giả trình bày một thuật toán tránh vật cản với cách tiếp cận thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) để điều khiển các robot trong ứng dụng tìm kiếm tập thể. Ý tưởng này còn nhiều hạn chế để mô phỏng khi có nhiều yếu tố thực tế giới hạn chương trình. Vấn đề tránh vật cản trong robot học đã được nghiên cứu rất rộng rãi và có nhiều thuật toán điều khiển được đưa ra để giải quyết vấn đề này. Tuy nhiên, hầu hết các thuật toán được xây dựng dựa trên cơ sở robot đơn lẻ, có kích thước và khối lượng lớn. Trong [2], các tác giả đã sử dụng bộ điều khiển mờ cho việc theo dõi đường đi và tránh trở ngại trên đường di chuyển của một robot bánh xe di động (WMR), kết quả đạt được là robot đã tránh được vật cản, nhưng chỉ dừng lại ở việc khảo sát trên một cá thể robot. Trong [3], [4] đã phân tích, chứng minh sự ổn định của bầy robot di chuyển trong môi trường không có chướng ngại vật, với lực hút/đẩy giữa các cá thể được thiết lập dựa trên cơ sở logic mờ. Để phát triển hơn các nội dung đã nghiên cứu ở [3] và [4], trong [5] các tác giả đã xây dựng mô hình toán của bầy đàn không chỉ dựa trên lực tương tác giữa các cá thể robot trong bầy mà còn phụ thuộc vào lực tương tác giữa các cá thể robot với môi trường, cụ thể là với vật cản nằm trên đường di chuyển và với mồi. Các lực tương tác này đều được mô tả bởi các hàm logic mờ, kết quả đạt được là các robot trong bầy đã tránh được vật cản và tìm được mồi.

Trong nội dung bài báo này, chúng tôi đưa ra giải pháp điều khiển robot bầy đàn dựa trên kỹ thuật điều khiển hành vi không gian rỗng NSB: chia nhiệm vụ lớn của bầy robot thành các nhiệm vụ nhỏ, xác định mức độ ưu tiên của từng nhiệm vụ, sau đó chiếu nhiệm vụ có mức độ ưu tiên thấp hơn vào không gian rỗng của nhiệm vụ ưu tiên cao hơn. Điều kiện ổn định quá trình hội tụ cũng được đưa ra trong nghiên cứu này, và cuối cùng là các kết quả mô phỏng kiểm chứng tính đúng đắn của nghiên cứu lý thuyết bằng phần mềm Matlab.

2. Nội dung chính

2.1 Khái niệm không gian rỗng

Xem xét một bầy robot có N cá thể di chuyển trong không gian n chiều, gọi $p_i = \begin{bmatrix} p_{i1} \\ p_{i2} \\ \dots \\ p_{in} \end{bmatrix} \in R^n$: là vị trí và $u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \ldots \\ u_n \end{bmatrix} \in R^n$: là vector vận tốc di chuyển của cá thể thứ i (i = 1 ÷ N), mô hình toán học của cá thể i được mô tả như sau:

$$\dot{p}_i = u \quad (1)$$

Gọi σ là giá trị đầu vào điều khiển để cá thể i hoàn thành mục tiêu nhiệm vụ, lúc đó σ sẽ phụ thuộc vào p, có nghĩa là:

$$\sigma = f(p) \quad (2)$$

Đạo hàm (2) theo thời gian:

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial f(p)}{\partial p}\dot{p} \quad (3)$$

Kết hợp (1) và (3): $\dot{\sigma} = J(p)u$

trong đó: J(p) là ma trận Jacobian, $J(p) \in R^{1\times n}$

Suy ra: $u = J^{+}\dot{\sigma} = J^{T}(JJ^{T})^{-1}\dot{\sigma}$ (4)

trong đó: J^+ là ma trận giả nghịch đảo của J(p), $J^{+} \in R^{n\times 1}$

Gọi d là khoảng cách mong muốn từ robot tới mục tiêu, lúc đó (4) được viết lại như sau:

$$u = \lambda J^{+}(\sigma - d) = \lambda J^{+}\tilde{\sigma} \quad (5)$$

trong đó: λ là hệ số dương, $\tilde{\sigma} = (\sigma - d)$: được gọi là sai lệch giữa giá trị thực tế so với giá trị mong muốn.

Ma trận hình chiếu trực giao vào không gian rỗng của J được xác định bởi:

$$N_J = I - J^{+}J$$

trong đó I là ma trận đơn vị $I \in R^{n\times n}$.

N_J được gọi là không gian rỗng của nhiệm vụ đang cần hoàn thành. Ma trận N_J là một ma trận đối xứng, và nó có thể dễ dàng chỉ ra rằng:

$$N_J(AN_J)^{+} = (AN_J)^{+} \text{ với } \forall A \in R^{1\times n}$$

$$N_J^{+} = N_J$$

$$JN_J = N_J J^{+} = 0$$

2.2 Điều khiển hành vi dựa trên không gian rỗng

Khi robot bầy đàn thực hiện nhiệm vụ di chuyển tới đích, trên đường di chuyển chúng phải tránh các vật cản nằm trên đường để không bị hư hỏng. Vì thế mỗi cá thể robot trong bầy phải thực hiện ba nhiệm vụ sau:

- Nhiệm vụ thứ nhất: tránh vật cản.
- Nhiệm vụ thứ hai: di chuyển tới mục tiêu.
- Nhiệm vụ thứ ba: duy trì bầy đàn để tránh va chạm giữa các cá thể trong bầy với nhau nhưng không làm phân tách nhóm.

Để điều khiển robot thực hiện các nhiệm vụ trên thì người giám sát có thể chọn mức độ ưu tiên khi thực hiện các nhiệm vụ. Trong nghiên cứu này tác giả chọn mức độ ưu tiên theo thứ tự: tránh vật cản, di chuyển tới mục tiêu và cuối cùng là nhiệm vụ duy trì bầy đàn. Với kỹ thuật điều khiển hành vi dựa trên không gian rỗng thì vector vận tốc di chuyển của mỗi cá thể robot được tổng hợp theo giản đồ H. 1.

Vận tốc di chuyển của cá thể robot thứ i được xác định như sau:

$$u = u_o + N_o u_g + N_{og} u_s$$

trong đó: u_o, u_g, u_s lần lượt là các vector vận tốc thực hiện các nhiệm vụ: tránh vật cản, di chuyển tới mục tiêu và duy trì bầy đàn, N_o, N_{og} là các ma trận rỗng được tính toán theo thứ tự ưu tiên của các nhiệm vụ.

- *Xác định vận tốc robot tránh vật cản:*

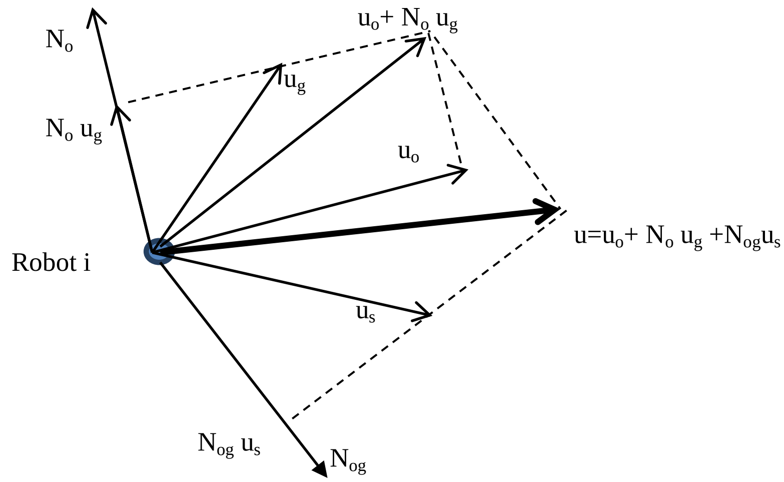
Gọi M là số lượng vật cản có trong môi trường di chuyển của robot bầy đàn, $p_{om} = \begin{bmatrix} p_{o1} \\ p_{o2} \\ \ldots \\ p_{on} \end{bmatrix} \in R^n$: là vị trí của vật cản thứ m (m=1÷M), $\sigma_o \in R$: khoảng cách thực tế giữa cá thể robot thứ i và vật cản thứ m:

$$\sigma_o = \|p_{om} - p_i\| = \sqrt{(p_{om1} - p_{i1})^2 + \ldots + (p_{omn} - p_{in})^2}$$

Mong muốn của việc điều khiển robot tránh vật cản: nếu vật cản nằm trên đường robot di chuyển tới đích thì robot phải cách vật cản một khoảng cách an toàn do (còn gọi là khoảng cách mong muốn) $\sigma_{o,d} = d_o$, nếu vật cản nằm ngoài vùng di chuyển của robot thì vật cản không làm ảnh hưởng đến vận tốc di chuyển của robot. Điều đó có nghĩa rằng, vận tốc di chuyển của robot phụ thuộc vào khoảng cách giữa robot tới vật cản.

Ma trận Jacobian $J_o \in R^{M\times n}$: biểu diễn vector vận tốc di chuyển của robot tránh vật cản:

$$J_o = \begin{bmatrix} \left[\dfrac{p_{o1} - p_i}{\|p_{o1} - p_i\|}\right]^T \\ \ldots \\ \left[\dfrac{p_{oM} - p_i}{\|p_{oM} - p_i\|}\right]^T \end{bmatrix} = \hat{p}_{io}^T \quad (6)$$



H. 1 *Giản đồ tổng hợp vận tốc theo phương pháp NSB khi robot i thực hiện ba nhiệm vụ*

Ma trận giả nghịch đảo của J_o:

$$J_o^+ = \hat{p}_{io},\ J_o^+ \in R^{n\times M}$$

Ma trận hình chiếu trực giao của J_o:

$$N_o = I_n - \hat{p}_{io}\hat{p}_{io}^T,\ N_o \in R^{n\times n} \qquad (7)$$

Từ (5) suy ra vector vận tốc robot tránh vật cản được xác định như sau:

$$u_o = -\lambda_o J_o^+ (\sigma_o - d_o) = -\lambda_o J_o^+ \tilde{\sigma}_o \qquad (8)$$

trong đó: $\tilde{\sigma}_o = \sigma_o - d_o$ là sai lệch giữa khoảng cách thực tế và khoảng cách mong muốn từ robot đến vật cản.

- *Xác định vận tốc robot di chuyển đến mục tiêu:*

Gọi: $p_g = \begin{bmatrix} p_{g1} \\ p_{g2} \\ \dots \\ p_{gn} \end{bmatrix} \in R^n$ là vị trí của mục tiêu cần tìm kiếm, $\sigma_g \in R$ là khoảng cách thực tế giữa robot thứ tới mục tiêu, lúc đó σ_g được tính toán theo công thức:

$$\sigma_g = \|p_g - p_i\| = \sqrt{(p_{g1} - p_{i1})^2 + \dots + (p_{gn} - p_{in})^2}$$

Mong muốn của việc điều khiển robot hướng tới đích là robot chạm vào mục tiêu, tức là khoảng cách mong muốn d_g bằng 0:

$$\sigma_{g,d} = d_g = 0$$

Ma trận Jacobian $J_g \in R^{1\times n}$:

$$J_g = \left[\frac{p_g - p_i}{\|p_g - p_i\|}\right]^T = \hat{p}_{ig}^T \qquad (9)$$

Ma trận giả nghịch đảo của J_g:

$$J_g^+ = \hat{p}_{ig},\qquad J_g^+ \in R^{n\times 1}$$

Ma trận hình chiếu trực giao của J_g:

$$N_g = I_2 - \hat{p}_{ig}\hat{p}_{ig}^T,\ N_g \in R^{n\times n} \qquad (10)$$

Từ (5) suy ra vector vận tốc di chuyển tới đích của robot i được viết lại như sau:

$$u_g = \lambda_g J_g^+ (\sigma_g - d_g) = \lambda_g J_g^+ \tilde{\sigma}_g \qquad (11)$$

trong đó: $\tilde{\sigma}_g = \sigma_g - d_g = \sigma_g$ là sai lệch giữa khoảng cách thực tế và khoảng cách mong muốn từ robot đến đích.

- *Xác định vector vận tốc duy trì bầy:*

Trong các nhiệm vụ của robot bầy đàn thì nhiệm vụ duy trì bầy là một trong những nhiệm vụ rất quan trọng, đã có rất nhiều công trình khoa học nghiên cứu về vấn đề này. Trong [4], chúng tôi đã phân tích hành vi hội tụ của bầy đàn dựa trên lực hút/đẩy mờ. Khoảng cách thực tế giữa cá thể robot thứ i và thứ j (j=1÷N, j≠i) là:

$$\sigma_s = \|p_j - p_i\| = \sqrt{(p_{j1} - p_{i1})^2 + \dots + (p_{jn} - p_{in})^2}$$

Mục tiêu của việc điều khiển là duy trì khoảng cách giữa hai cá thể robot luôn giữ ở hằng số $\sigma_{s,d} = \sigma_s^* \in R^N$

Gọi $\tilde{\sigma}_s$ là sai lệch giữa khoảng cách thực tế và khoảng cách mong muốn: $\tilde{\sigma}_s = \sigma_s - \sigma_s^*$

Trong nghiên cứu [4], mô hình động lực học của cá thể robot thứ i được xác định như sau:

$$\dot{p}^i = u_s = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \mu \ \left\| p_j - p_i \right\| \ \frac{p_j - p_i}{\left\| p_j - p_i \right\|}$$

$$= \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \mu \ \ \sigma_s \ \ \frac{p_j - p_i}{\left\| p_j - p_i \right\|} \qquad (12)$$

trong đó: $\mu \ \ \sigma_s$ là lực tương tác giữa cặp cá thể (i, j), lực này được tính toán dựa trên cơ sở logic mờ [4]:

$$\begin{cases} \mu \ \ \sigma_s \ > 0, khi: \sigma_s > \sigma_s^* \\ \mu \ \ \sigma_s \ < 0, khi: 0 < \sigma_s < \sigma_s^* \\ \mu \ \ \sigma_s \ = 0, khi: \sigma_s = \sigma_s^* \end{cases} \qquad (13)$$

Ma trận Jacobian:

$$J_s = \hat{p}_s^T = \begin{bmatrix} J_{s1} \\ J_{s2} \\ .... \\ J_{sN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{s1}^T \\ \hat{p}_{s2}^T \\ .... \\ \hat{p}_{sN}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{p_1 - p_i}{\left\| p_1 - p_i \right\|} \right]^T \\ \left[\frac{p_2 - p_i}{\left\| p_2 - p_i \right\|} \right]^T \\ .... \\ \left[\frac{p_N - p_i}{\left\| p_N - p_i \right\|} \right]^T \end{bmatrix} \in R^{N\times n} \qquad (14)$$

Ma trận giả nghịch đảo của J_s:

$$J_s^+ = \hat{p}_s = \begin{bmatrix} J_{s1} \\ J_{s2} \\ .... \\ J_{sN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{s1}^T \\ \hat{p}_{s2}^T \\ .... \\ \hat{p}_{sN}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{p_1 - p_i}{\left\| p_1 - p_i \right\|} \right]^T \\ \left[\frac{p_2 - p_i}{\left\| p_2 - p_i \right\|} \right]^T \\ .... \\ \left[\frac{p_N - p_i}{\left\| p_N - p_i \right\|} \right]^T \end{bmatrix} \in R^{n\times N} \qquad (15)$$

Ma trận hình chiếu trực giao của J_s:

$$N_s = I_n - \hat{p}_s \hat{p}_s^T \ , \ N_s \in R^{n\times n} \qquad (16)$$

Từ (5) suy ra vector vận tốc của cá thể robot thứ i làm nhiệm vụ duy trì bầy đàn được xác dịnh như sau:

$$u_s = J_s^+ \mu \ \ \tilde{\sigma}_s \ \ \in R^{n\times 1} \qquad (17)$$

• Tổng hợp vector vận tốc di chuyển của mỗi cá thể robot trong bầy khi thực hiện cả ba nhiệm vụ dựa trên kỹ thuật NSB như H.1:

$$u = u_o + N_o u_g + N_{og} u_s$$
$$= -\lambda_o J_o^+ \tilde{\sigma}_o + \lambda_g N_o J_g^+ \tilde{\sigma}_g + N_{og} J_s^+ \mu \ \ \tilde{\sigma}_s \ \ ,$$
$$u \in R^{n\times 1} \qquad (18)$$

trong đó: $J_{og} = \begin{bmatrix} J_o \\ J_g \end{bmatrix}$, $J_{og} \in R^{n\times n}$;

$$N_{og} = I_n - J_{og}^+ J_{og} \ , \ N_{og} \in R^{n\times n}$$

2.3 Thuật toán điều khiển hành vi robot bầy đàn dựa trên nguyên lý NSB và logic mờ

Để điều khiển robot bầy đàn thực hiện ba mục tiêu nhiệm vụ: tránh vật cản, tìm kiếm mục tiêu và duy trì bầy đàn thì cần phải thực hiện theo các bước sau:

**** Bước 1:***

- Nhập số lượng robot trong bầy: N.
- Nhập số lượng vật cản trong không gian di chuyển của robot bầy đàn: M.
- Đặt vị trí ban đầu cho các robot trong không gian n chiều: $p_1 = \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ ... \\ p_{1n} \end{bmatrix}, p_2 = \begin{bmatrix} p_{21} \\ p_{22} \\ ... \\ p_{2n} \end{bmatrix}, ..., p_N = \begin{bmatrix} p_{N1} \\ p_{N2} \\ ... \\ p_{Nn} \end{bmatrix}$
- Đặt vị trí M vật cản và mục tiêu g trong không gian n chiều:

$$p_{o1} = \begin{bmatrix} p_{o11} \\ p_{o12} \\ ... \\ p_{o1n} \end{bmatrix}, ..., p_{oM} = \begin{bmatrix} p_{oM1} \\ p_{oM2} \\ ... \\ p_{oMn} \end{bmatrix}, \ p_g = \begin{bmatrix} p_{g1} \\ p_{g2} \\ ... \\ p_{gn} \end{bmatrix}$$

- Nhập khoảng cách an toàn giữa các cá thể robot với vật cản d_o, và khoảng cách giữa các cá thể robot với nhau σ_s^*
- Nhập các hệ số λ_o và λ_g .
- Nhập số bước tính K.

**** Bước 2****:*

- Tính khoảng cách giữa robot thứ i (i=1÷N) với từng vật cản σ_o , giữa robot thứ i với đích đến σ_g và giữa robot thứ i với robot thứ j (j=1÷N, j≠i) σ_s .
- Tính lực hút/đẩy mờ $\mu \ \ \sigma_s$ sao cho thỏa mãn điều kiện (13) [4].

**** Bước 3:***

- So sánh khoảng cách thực tế và khoảng cách an toàn từ robot i tới vật cản o_m (m=1, 2,…M). Nếu:
- $\sigma_o \geq d_o$: robot thứ i không cần tránh vật cản o, tức là $J_o = 0$
- $\sigma_o < d_o$: robot thứ i cần phải tránh vật cản o, lúc này cần tính J_o theo (6).
- Tính: J_o^+, N_o, u_o .

- So sánh khoảng cách thực tế và khoảng cách mong muốn từ robot i tới đích đến. Nếu:
- $\sigma_g = 0$: robot thứ i đã gặp đích đến g, $J_g = 0$.

- $\sigma_g > 0$: robot thứ i chưa gặp đích đến g, tính J_g theo (9).
- Tính: J_g^+, N_g, u_g.
- Tính: J_{og}, J_{og}^+, N_{og}

- So sánh khoảng cách thực tế và khoảng cách mong muốn từ robot i tới robot thứ j. Nếu:

- $\sigma_s > \sigma_s^*$: robot thứ i và robot thứ j di chuyển về phía nhau nhờ hàm hút $\mu(\sigma_s) > 0$.
- $\sigma_s < \sigma_s^*$: robot thứ i và robot thứ j di chuyển về phía cách xa nhau nhờ hàm đẩy $\mu(\sigma_s) < 0$.
- $\sigma_s = \sigma_s^*$: robot thứ i giữ nguyên lộ trình di chuyển $\mu(\sigma_s) = 0$.
- Tính: J_s, u_s

**** Bước 4:***

- Vận tốc di chuyển của cá thể i ở bước tính k (k=0÷K-1) được xác định theo:

$$u[k] = u_o[k] + N_o[k]u_g[k] + N_{og}[k]u_s[k]$$

- Quãng đường robot i di chuyển được tương ứng với một bước tính Δt :

$$\Delta S^i[k+1] = \Delta S^i[k] + u[k] * \Delta t$$

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

$$p^i[k+1] = p^i[k] + \Delta S^i[k+1] * \Delta t$$

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

2.4 Phân tích sự ổn định của robot bầy đàn dựa trên kỹ thuật NSB

Định lý:

Các điều kiện cần và đủ để ổn định mục tiêu nhiệm vụ là Jacobians của các nhiệm độc lập như tránh vật cản o, tìm kiếm mục tiêu g, duy trì bầy và Jacobians được ghép bởi hai nhiệm vụ tránh vật cản – tìm kiếm đích phải thỏa mãn các điều kiện độc lập sau:

$$\begin{cases} \rho\left(J_o^T\right) + \rho\left(J_g^T\right) = \rho\left(\begin{bmatrix} J_o^T & J_g^T \end{bmatrix}\right) & (19) \\ \rho\left(J_s^T\right) + \rho\left(J_{og}^T\right) = \rho\left(\begin{bmatrix} J_s^T & J_{og}^T \end{bmatrix}\right) & (20) \end{cases}$$

trong đó $\rho(.)$ là hạng của ma trận.

Chứng minh:

Gọi $\tilde{\sigma}$ là vector sai lệch mục tiêu nhiệm vụ, tức là $\tilde{\sigma} = \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o \\ \tilde{\sigma}_g \\ \tilde{\sigma}_s \end{bmatrix}$, mục đích của việc điều khiển là làm sao cho $\tilde{\sigma} = 0$.

Chọn hàm thế năng Lyapunov: $V(\tilde{\sigma}): R^N \to R$ là một hàm liên tục, khả vi:

$$V(\tilde{\sigma}) = \frac{1}{2}\tilde{\sigma}^T\tilde{\sigma}$$

Đạo hàm V(.) theo thời gian:

$$\dot{V} = \tilde{\sigma}^T\dot{\tilde{\sigma}} = -\tilde{\sigma}^T \begin{bmatrix} J_o \\ J_g \\ J_s \end{bmatrix} u$$

$$= -\tilde{\sigma}^T \begin{bmatrix} -\lambda_o\tilde{\sigma}_o \\ \lambda_o J_g J_o^+\tilde{\sigma}_o + \lambda_g J_g N_o J_g^+\tilde{\sigma}_g \\ \lambda_o J_g J_o^+\tilde{\sigma}_o + \lambda_g J_s N_o J_g^+\tilde{\sigma}_g + J_s N_{og} J_s^+ \mu(\tilde{\sigma}_s) \end{bmatrix}$$

$$\dot{V} = -\begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o & \tilde{\sigma}_g & \tilde{\sigma}_s^T \end{bmatrix} *$$

$$* \begin{bmatrix} -\lambda_o & 0 & 0 \\ \lambda_o J_g J_o^+ & \lambda_g J_g N_o J_g^+ & 0 \\ \lambda_o J_s J_o^+ & \lambda_g J_g N_o J_g^+ & J_s N_{og} J_s^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o \\ \tilde{\sigma}_g \\ \mu(\tilde{\sigma}_s) \end{bmatrix}$$

$$\dot{V} = -\begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o & \tilde{\sigma}_g & \tilde{\sigma}_s^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o \\ \tilde{\sigma}_g \\ \mu(\tilde{\sigma}_s) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Do thực tế có: $J_o N_o = 0$, $J_o N_{og} = 0$, $J_g N_{og} = 0$

Cần phải chứng minh được rằng hàm:

$$V = \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o & \tilde{\sigma}_g & \tilde{\sigma}_s^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_o \\ \tilde{\sigma}_g \\ \mu(\tilde{\sigma}_s) \end{bmatrix}$$

là xác định dương.

Chứng minh *điều kiện cần* của tính xác định dương của V_1: ba phần tử đầu tiên trên đường chéo chính của V_1 là $m_{11} > 0, m_{22} > 0$ và $\tilde{\sigma}_s^T M_{33}\mu(\tilde{\sigma}_s)$ là xác định dương. Phần tử m_{11} là xác định dương nếu hệ số $\lambda_o < 0$. Phần tử m_{22} là xác định dương nếu tránh vật cản o và tìm kiếm đích g là các nhiệm vụ độc lập, tức là điều kiện (19) được thảo mãn và hệ số $\lambda_g > 0$. Hàm $\tilde{\sigma}_s^T M_{33}\mu(\tilde{\sigma}_s)$ là xác định dương nếu ma trận M_{33} là xác định dương. Để chứng minh điều đó cần chứng minh các giá trị riêng của ma trận M_{33} là xác định dương $0 < \underline{\lambda}_{33} = \lambda_1 < \lambda_2 < \ldots < \lambda_N$. Do đó chúng ta có thể viết:

$$\tilde{\sigma}_s^T M_{33}\mu\ \ \tilde{\sigma}_s\ = \lambda_1 \tilde{\sigma}_{s_1}\mu\ \ \tilde{\sigma}_{s_1}\ + \lambda_2 \tilde{\sigma}_{s_2}\mu\ \ \tilde{\sigma}_{s_2}\ + \ldots$$
$$+ \lambda_N \tilde{\sigma}_{s_N}\mu\ \ \tilde{\sigma}_{s_N}$$

Lưu ý rằng:

$$k_1 \tilde{\sigma}_{s_i} \le \mu\ \ \tilde{\sigma}_{s_i}\ \le k_2 \tilde{\sigma}_{s_i},\ 0 < k_1 < k_2,\ \ 0 < k_1 < k_2$$

với $i = 1, 2, \ldots, N$

Nên: $k_1 \tilde{\sigma}_{s_i}^2 \le \tilde{\sigma}_{s_i}\mu\ \ \tilde{\sigma}_{s_i}\ \le k_2 \tilde{\sigma}_{s_i}^2$

Do đó $\tilde{\sigma}_s^T M_{33}\mu\ \ \tilde{\sigma}_s$ là xác định dương.

Ma trận M_{33} là xác định dương nếu các nhiệm vụ tách biệt là độc lập tuyến tính, tức là hạng của các ma trận nhiệm vụ duy trì bầy và nhiệm vụ xếp chồng tránh vật cản o - di chuyển tới đích g phải thỏa mãn điều kiện (20).

Chứng minh các điều kiện đủ của định lý:

Trong công thức:

$$V_1 = \tilde{\sigma}_o^2 m_{11} + \tilde{\sigma}_g^2 m_{22} + \tilde{\sigma}_s^T M_{33}\mu\ \ \tilde{\sigma}_s\ +$$
$$+ \tilde{\sigma}_g^T m_{21}\tilde{\sigma}_o + \tilde{\sigma}_s^T M_{31}\tilde{\sigma}_o + \tilde{\sigma}_s^T M_{32} \qquad (22)$$

Cụ thể như sau:

$$\tilde{\sigma}_o^2 m_{11} = -\lambda_o \tilde{\sigma}_o^2$$
$$\tilde{\sigma}_g^2 m_{22} = \lambda_g J_g N_o J_g^+ \tilde{\sigma}_g^2$$
$$\tilde{\sigma}_g^T m_{21}\tilde{\sigma}_o \ge -\left|\lambda_o J_g J_o^+\right| \left|\tilde{\sigma}_g\right| \left|\tilde{\sigma}_o\right|$$

Ta lại có:

$$\tilde{\sigma}_s^T M_{31}\tilde{\sigma}_o \ge -\lambda_o \bar{\lambda}_{31} \left\|\tilde{\sigma}_s\right\| \left|\tilde{\sigma}_o\right|$$
$$\tilde{\sigma}_s^T M_{32}\tilde{\sigma}_g \ge -\lambda_g \bar{\lambda}_{32} \left\|\tilde{\sigma}_s\right\| \left|\tilde{\sigma}_o\right|$$
$$\tilde{\sigma}_s^T M_{33}\mu\ \ \tilde{\sigma}_s\ \ge \underline{\lambda}_{33} k_1 \left\|\tilde{\sigma}_s\right\|^2$$

trong đó: $\bar{\lambda}_{31}$: giá trị lớn nhất của ma trận $J_s J_o^+$

$\bar{\lambda}_{32}$: giá trị lớn nhất của ma trận $J_s N_o J_g^+$.

Vì vậy:

$$V_1 \ge -\lambda_o J_g N_o J_g^+ \tilde{\sigma}_g^2 + \underline{\lambda}_{33} k_1 \left\|\tilde{\sigma}_s\right\|^2 - \lambda_o J_g J_o^+ \left|\tilde{\sigma}_s\right| \left|\tilde{\sigma}_o\right| -$$
$$-\lambda_o \bar{\lambda}_{31} \left\|\tilde{\sigma}_s\right\| \left|\tilde{\sigma}_o\right| - \lambda_g \bar{\lambda}_{32} \left\|\tilde{\sigma}_s\right\| \left|\tilde{\sigma}_o\right|$$

Có thể viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$V_1 \ge \begin{bmatrix} \left|\tilde{\sigma}_o\right| \\ \left|\tilde{\sigma}_g\right| \\ \left\|\tilde{\sigma}_s\right\| \end{bmatrix} \mathrm{P} \begin{bmatrix} \left|\tilde{\sigma}_o\right| \\ \left|\tilde{\sigma}_g\right| \\ \left\|\tilde{\sigma}_s\right\| \end{bmatrix}$$

trong đó ma trận $\mathrm{P} \in R^{3\times 3}$ được định nghĩa như sau:

$$\mathrm{P} = \begin{bmatrix} -\lambda_o & 0 & 0 \\ -\lambda_o J_g J_o^+ & \lambda_g J_g N_o J_g^+ & 0 \\ -\lambda_o \bar{\lambda}_{31} & -\lambda_g \bar{\lambda}_{32} & k_1 \underline{\lambda}_{31} \end{bmatrix} \qquad (23)$$

Để V_1 là xác định dương thì P phải xác định dương, điều đó có nghĩa rằng, các phần tử nằm trên đường chéo chính của P là xác định dương theo định lý Sylvester:

$$\lambda_o < 0 \qquad (24)$$

$$\lambda_g > 0 \text{ và } J_g N_o J_g^+ > 0 \qquad (25)$$

$$k_1 > 0 \text{ và } J_s N_{og} J_s^+ > 0 \qquad (26)$$

Từ (7):

$$J_g N_o J_g^+ = 1 - J_g \frac{J_o^T}{\left\|J_o\right\|^2} J_g \frac{J_g^T}{\left\|J_g\right\|^2} =$$

$$= 1 - \frac{J_g J_o^T}{\left\|J_o\right\|^2} \frac{J_g J_o^{T\ T}}{\left\|J_g\right\|^2} = 1 - \frac{\left|\left\langle J_g, J_o^T \right\rangle\right|^2}{\left\|J_o\right\|^2 \left\|J_g\right\|^2}$$

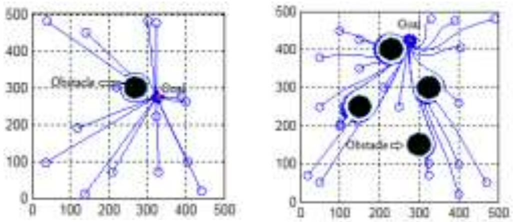
Theo bất đẳng thức Cauchy – Schwarz:

$\left|\left\langle J_g, J_o^T \right\rangle\right|^2 \le \left\|J_o\right\|^2 \left\|J_g\right\|^2$, $J_g N_o J_g^+ \ge 0$, dấu bằng xảy ra khi và chỉ khi J_o và J_g là hai vector phụ thuộc tuyến tính, $J_g N_o J_g^+ < 0$ khi và chỉ khi J_o và J_g là hai vector độc lập tuyến tính. Nói cách khác, (25) đúng thì công thức (19) là đúng. Tương tự như vậy, $J_s N_{og} J_s^+ > 0$ khi và chỉ khi J_{og} và J_s là hai vector độc lập tuyến tính, điều đó có nghĩa rằng (26) đúng thì công thức (20) là đúng.

Định lý đã được chứng minh.

2.4 Kết quả mô phỏng

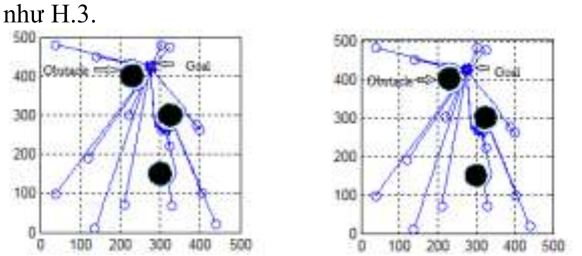
Đối với mỗi mô phỏng, không gian tìm kiếm được thiết lập trên hệ tọa độ hai chiều [500, 500]. Các vị trí ban đầu của robot, vật cản, mục tiêu được khởi tạo ngẫu nhiên. H.2 cho thấy quá trình di chuyển của các robot trong bầy hướng tới hội tụ ở mục tiêu bằng phương thức điều khiển hành vi của robot dựa trên không gian rỗng khi các hệ số λ_o là xác định âm và λ_g là xác định dương. Khi số lượng vật cản M trong môi trường tăng lên thì hệ số tránh vật cản λ_o phải càng âm.



a. N=15, M=1, $\lambda_o = -5.5,$ $\lambda_g = 0.05$ b. N=21, M=4, $\lambda_o = -75.5,$ $\lambda_g = 0.05$

H.2 *Quá trình tụ bầy của robot bầy đàn khi các hệ số λ_o là xác định âm và λ_q là xác định dương*

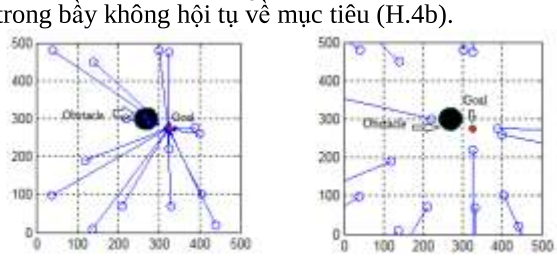
Khi các robot bầy đàn đã hội tụ về mục tiêu thì chúng chỉ có thể di chuyển xung quanh khu vực mục tiêu chứ không di chuyển ra xa để tránh làm phân tách bầy như H.3.



a.N=15, M=3, t=50s $\lambda_o = -5.5,$ $\lambda_g = 0.05,$ b.N=21, M=3, t=100s $\lambda_o = -5.5,$ $\lambda_g = 0.05$

H.3 *Quá trình ổn định tụ bầy của robot bầy đàn*

Khi hệ số λ_o là xác định dương thì có một số cá thể trong bầy không tránh được vật cản mà vẫn bị va chạm vào (H.4a), khi λ_g là xác định âm thì các cá thể trong bầy không hội tụ về mục tiêu (H.4b).



a.N=15, M=1, $\lambda_o = 5.5$ $\lambda_g = 0.05$ b. N=15, M=1, $\lambda_o = -5.5$ $\lambda_g = -0.05$

H.4 *Quá trình tụ bầy của robot bầy đàn khi các hệ số λ_o là xác định dương hoặc λ_g là xác định âm*

Kết quả mô phỏng H.2 và H.3 đã khẳng định tính đúng đắn của thuật toán điều khiển quá trình thực hiện các mục tiêu nhiệm vụ: Tránh được vật cản, tìm kiếm được mục tiêu và duy trì được bầy đàn.

3. Kết luận

Bài báo đã đưa ra giải pháp điều khiển robot bầy đàn dựa trên kỹ thuật NSB, đồng thời chứng minh sự ổn định hội tụ của thuật toán dựa trên lý thuyết Lyapunov. Kết quả mô phỏng thể hiện: các cá thể robot đã tránh được chướng ngại vật và tìm thấy mục tiêu sau một thời gian di chuyển xác định**.** Nội dung nghiên cứu của bài báo cho thấy rằng việc áp dụng NSB để giải quyết vấn đề tìm kiếm tập thể trong môi trường có nhiều trở ngại là rất thiết thực và hiệu quả.

Tài liệu tham khảo

[1]. Lisa L. Smith, Ganesh K. Venayagamoorth, Phillip G. Holloway, *Obstacle Avoidance in Collective Robotic Search Using Particle Swarm Optimization*, IEEE Swarm Intelligence Symposium, 05/12.

[2]. Luis Conde Bento, Gabriel Pires, Urbano Nunes, *A Behavior Based Fuzzy Control Architecture for Path Tracking and Obstacle Avoidance*, Proceedings of the 5th Portuguese Conference on Automatic Control, Aveiro, pp.341- 346, 2002.

[3]. Le Hung Lan, Le Thi Thuy Nga, Le Hong Lan, *Aggregation Stability of Multiple Agents With Fuzzy Attraction and Repulsion Forces*, pp. 81-85, MMAR 2013.

[4]. Lê Hùng Lân, Lê Thị Thúy Nga, *Phân tích sự ổn định tụ bầy của robot bầy đàn sử dụng hàm hút/đẩy mờ*, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, pp. 88-93, 10/ 2013.

[5]. Lê Thị Thúy Nga, Lê Hùng Lân, *Điều khiển robot bầy đàn tìm kiếm mồi và tránh vật cản sử dụng logic mờ*, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, pp. 15-20, 3/ 2014.

[6]. R.Brooks, *A robust layered control system for a mobile robot*. 2(1), pp.14–23, 1986.

Lê Thị Thúy Nga sinh năm 1977, nhận bằng Kỹ sư Tự động hóa tại Trường Đại Học Bách Khoa Hà Nội năm 2000, bằng Thạc sỹ Kỹ thuật Tự động hóa tại Trường Đại Học Bách Khoa Hà Nội năm 2005.

Hiện nay đang là Giảng Viên thuộc Bộ môn Điều khiển học, Khoa Điện – Điện Tử, Trường Đại học Giao thông vận tải.

Lê Hùng Lân sinh năm 1960, nhận bằng Kỹ sư Điều khiển học kỹ thuật tại Tiệp Khắc năm 1983, nhận bằng Tiến sỹ Điều khiển tự động tại CHLB Nga năm 1993, và nhận học hàm GS năm 2013. GS. TS Lê Hùng Lân hiện nay đang là Viện trưởng – Viện Ứng dụng Công nghệ, Bộ Khoa học Công nghệ.