

DISTRIBUTED FORMATION CONTROL OF MULTI-AGENT SYSTEMS BASED ON RIGIDITY GRAPH THEORY APPLIED IN MOVING TARGET TRACKING

Nguyen Thi Tuyet Hoa, Nguyen Tuan Minh*

TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 16/10/2023 Revised: 23/11/2023 Published: 24/11/2023	This paper focuses on the design of distributed formation control law for multi-agent systems based on rigidity graph theory and applied to the task of tracking and encircling a moving target. The multi-agent system is described as an undirected graph that is infinitesimally and minimally rigid. The control law is composed of a formation control component and a target tracking and encirclement mechanism to ensure stable formation during mission performance. The leader-follower strategy is applied to solve this problem to increase efficiency and simplify the design process. Accordingly, the target's velocity value is unknown to all agents, but the leader can determine the target's relative position and estimate the target's velocity value, then transmit this information to the followers. The proposed control law is verified through simulations in three-dimensional space on Matlab software. The results show that the multi-agent system is capable of establishing and maintaining the desired formation throughout the process of tracking and encircling a moving target.
KEYWORDS	
Distributed formation control	
Multi-agent systems	
Graph rigidity theory	
Moving target tracking	
Leader-follower strategy	

ĐIỀU KHIỂN NHÓM PHÂN TÁN CHO HỆ ĐA TÁC TỬ DỰA TRÊN LÝ THUYẾT ĐỒ THỊ CỨNG ỨNG DỤNG TRONG THEO DÕI MỤC TIÊU DI ĐỘNG

Nguyễn Thị Tuyết Hoa, Nguyễn Tuấn Minh*

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 16/10/2023 Ngày hoàn thiện: 23/11/2023 Ngày đăng: 24/11/2023	Bài báo này tập trung vào việc thiết kế luật điều khiển nhóm cho hệ đa tác tử dựa trên cơ sở của lý thuyết đồ thị cứng, ứng dụng trong nhiệm vụ theo dõi và bao vây một mục tiêu di động. Hệ đa tác tử được mô tả dưới dạng đồ thị vô hướng có độ cứng khoảng cách vị phân và tối thiểu. Luật điều khiển bao gồm thành phần điều khiển hình thành đội hình kết hợp với cơ chế điều khiển theo dõi và bao vây mục tiêu nhằm đảm bảo duy trì ổn định đội hình trong quá trình thực hiện nhiệm vụ. Chiến lược điều khiển nhóm trường – thành viên được sử dụng trong nghiên cứu để tăng tính hiệu quả và đơn giản hóa quy trình thiết kế. Theo đó, tất cả các tác tử đều không có thông tin về giá trị vận tốc của mục tiêu, tuy nhiên tác tử nhóm trưởng có thể xác định được vị trí tương đối và ước lượng giá trị vận tốc của mục tiêu, sau đó truyền các thông tin này cho những tác tử thành viên. Luật điều khiển đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng trong không gian ba chiều trên phần mềm Matlab. Các kết quả cho thấy hệ đa tác tử có khả năng thiết lập và đảm bảo duy trì được đội hình đặt trong suốt quá trình theo dõi và bao vây mục tiêu di động.
TỪ KHÓA	
Điều khiển nhóm phân tán	
Hệ đa tác tử	
Lý thuyết đồ thị cứng	
Theo dõi mục tiêu di động	
Nhóm trưởng – thành viên	

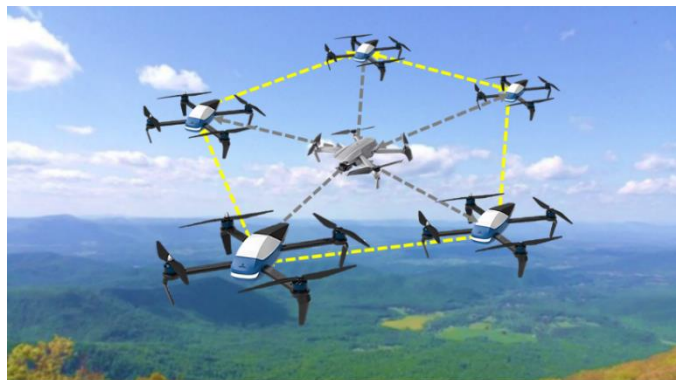
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8987>

* Corresponding author. Email: nguyentuanminh@tnut.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong những thập niên gần đây với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ cảm biến, hệ thống nhúng, hệ thống thông tin và lưu trữ năng lượng thì việc triển khai các hệ đa tác tử (multi-agent systems - MAS) để thực thi các nhiệm vụ phức tạp ngày càng trở nên phổ biến với nhiều ứng dụng từ dân sự đến quân sự. Ví dụ như một hệ MAS gồm các phương tiện di động tự hành (các phương tiện tự hành trên mặt đất, dưới nước hoặc trên không) được triển khai để thực hiện các nhiệm vụ tìm kiếm, lập bản đồ, theo dõi, giám sát,... Thực tế cho thấy rằng việc sử dụng hệ MAS mang lại nhiều lợi ích hơn so với việc chỉ sử dụng một tác tử lớn đơn lẻ (single large agent) do chúng có khả năng thực hiện các nhiệm vụ phức tạp với hiệu quả và độ tin cậy cao, đồng thời cung cấp khả năng dự phòng khi gặp sự cố và khả năng mở rộng linh hoạt. Để hệ đa tác tử có thể hoàn thành tốt các nhiệm vụ thì cần thiết phải có các thuật toán điều khiển phối hợp mạnh mẽ và ổn định. Kỹ thuật điều khiển nhóm (formation control) hay còn gọi là điều khiển đội hình đang trở thành một trong những kỹ thuật tốt nhất hiện nay trong việc điều phối chặt chẽ giữa các tác tử trong hệ. Điều khiển nhóm được định nghĩa là một phương pháp điều khiển phối hợp để một hay nhiều nhóm tác tử cùng thực hiện các nhiệm vụ chung mà vẫn duy trì được đội hình đặt trong không gian [1].

Trong kỹ thuật điều khiển nhóm có hai cấu trúc điều khiển được áp dụng phổ biến đó là cấu trúc điều khiển tập trung và điều khiển phân tán. Đối với các hệ MAS phức tạp có quy mô lớn thì việc sử dụng cấu trúc điều khiển tập trung thường khó triển khai hoặc thậm chí không thể áp dụng được. Do đó, kỹ thuật điều khiển nhóm phân tán được nghiên cứu và phát triển rộng rãi hơn với khả năng tự tổ chức, dễ thực hiện và có độ tin cậy cao [2]. Trong các ứng dụng thực tế, mục tiêu điều khiển cho hệ đa tác tử không chỉ là nhiệm vụ hình thành đội hình đặt trong không gian mà còn cần thực hiện các nhiệm vụ phối hợp khác, trong đó có việc giám sát và theo dõi mục tiêu cố định hoặc di động [3], [4]. Hình 1 mô tả đội hình theo cấu trúc phân tán của một hệ máy bay không người lái (UAV) đang theo dõi và bao vây mục tiêu là một UAV khác.



Hình 1. Điều khiển nhóm phân tán hệ máy bay không người lái trong nhiệm vụ theo dõi và bao vây mục tiêu di động

Về mặt cơ sở toán học, kỹ thuật điều khiển nhóm cho hệ đa tác tử được phát triển trên cơ sở các khái niệm toán học của lý thuyết đồ thị và động lực học đồng thuận [5]. Trong đó, lý thuyết đồ thị được sử dụng như một công cụ hiệu quả để mô tả hình dạng đội hình hệ MAS trong không gian cũng như cấu trúc liên kết cảm biến, truyền thông và điều khiển giữa các tác tử trong cấu trúc phân tán. Để phối hợp với các tác tử trong hệ thì mọi tác tử cần chia sẻ thông tin với các tác tử lân cận nhằm đạt được thỏa thuận về một số mục tiêu quan tâm chung. Trong bài toán điều khiển nhóm, biến điều khiển có thể là vị trí tuyệt đối, vị trí tương đối hoặc khoảng cách giữa các tác tử [6]. Đối với các bài toán điều khiển nhóm dựa trên khoảng cách thì một câu hỏi đặt ra là ta cần chọn bao nhiêu biến khoảng cách và cần chọn các biến này như thế nào để khi các biến này thỏa mãn thì đội hình thu được chỉ sai khác đội hình đặt bởi một phép tịnh tiến hoặc một phép

quay. Lời giải đáp cho các câu hỏi này có trong lý thuyết đồ thị cứng, đây là một tập hợp con quan trọng của lý thuyết đồ thị, nó được nghiên cứu nhằm đảm bảo rằng các ràng buộc về khoảng cách giữa các tác tử trong đội hình đặt thông qua ma trận độ cứng của đồ thị, điều này đảm bảo rằng các tác tử tránh được va chạm lẫn nhau trong quá trình hình thành đội hình. Một ưu điểm nổi bật của việc sử dụng khoảng cách giữa các tác tử làm biến điều khiển là chúng có thể xác định thông qua vector sai lệch cục bộ và không phụ thuộc vào các hệ quy chiếu như phương pháp sử dụng thuật toán đồng thuận. Trong quá trình thiết kế điều khiển nhóm cho hệ MAS, việc lựa chọn chiến lược điều khiển phù hợp với nhiệm vụ cần thực hiện là rất quan trọng. Điều khiển nhóm bao gồm ba chiến lược điều khiển chính, bao gồm chiến lược dựa trên hành vi [7], [8], chiến lược nhóm trưởng – thành viên [9], [10] và chiến lược cấu trúc ảo [11], [12]. Chiến lược nhóm trưởng – thành viên có đặc điểm là phụ thuộc nhiều vào độ chính xác và ổn định của tác tử nhóm trưởng nhưng đối với nhiệm vụ theo dõi mục tiêu, đặc biệt là với mục tiêu di động thì chiến lược này thể hiện được thế mạnh đó là quy trình thiết kế đơn giản và khả năng triển khai dễ dàng [9], [13].

Được thúc đẩy bởi tình trạng nghiên cứu và xu thế phát triển hiện nay của kỹ thuật điều khiển nhóm cho hệ đa tác tử dựa vào biến khoảng cách, bài viết này sẽ tập trung nghiên cứu thuật toán điều khiển nhóm phân tán dựa trên lý thuyết đồ thị cứng, ứng dụng trong nhiệm vụ theo dõi và bao vây một mục tiêu di động trong khi vẫn duy trì đội hình đặt. Hệ đa tác tử được mô tả dưới dạng đồ thị đội hình có độ cứng khoảng cách vi phân và tối thiểu. Chiến lược điều khiển nhóm trưởng – thành viên được sử dụng trong nghiên cứu với giả thiết tất cả các tác tử đều không có thông tin về giá trị vận tốc của mục tiêu, tuy nhiên tác tử nhóm trưởng có thể xác định được vị trí tương đối và ước lượng giá trị vận tốc của mục tiêu, sau đó truyền các thông tin này cho các tác tử còn lại trong đội hình. Luật điều khiển đội hình được thiết kế để ổn định động lực học khoảng cách giữa các tác tử đến khoảng cách đặt. Luật điều khiển này bao gồm thành phần điều khiển hình thành đội hình đặt kết hợp với thành phần điều khiển theo dõi và bao vây mục tiêu di động.

Cấu trúc của bài báo được sắp xếp theo trình tự như sau: Phần 2 trình bày tóm tắt cơ sở lý thuyết đồ thị, lý thuyết đồ thị cứng và mô tả quá trình thiết kế luật điều khiển nhóm phân tán trong bài toán hình thành đội hình đặt và bài toán theo dõi bao vây mục tiêu di động. Phần 3 đưa ra các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab để kiểm chứng tính đúng đắn của luật điều khiển đề xuất. Cuối cùng, phần 4 đưa ra các kết luận và định hướng phát triển của vấn đề nghiên cứu này trong thời gian tới.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp thiết kế

2.1. Cơ sở lý thuyết

Lý thuyết đồ thị ứng dụng trong điều khiển nhóm có thể sử dụng đồ thị có hướng hoặc vô hướng để thể hiện sự trao đổi các luồng thông tin giữa các tác tử trong nhóm, nếu là tương tác một chiều thì sử dụng đồ thị có hướng $\vec{G} = (\mathcal{V}, \vec{\mathcal{E}})$, nếu là tương tác hai chiều thì sử dụng đồ thị vô hướng $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Thông thường, đối với sự tương tác giữa các tác tử trong cấu trúc phân tán là tương tác hai chiều, do vậy ta thường xét dạng đồ thị vô hướng. Xét một đội hình hệ đa tác tử được biểu diễn dưới dạng đồ thị vô hướng $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, trong đó, $\mathcal{V}$ là tập hợp các đỉnh đại diện cho n tác tử trong nhóm, $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$, $|\mathcal{V}| = n$, tập cạnh $\mathcal{E}$ thể hiện sự tương tác giữa các tác tử, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$, $|\mathcal{E}| = m$. Hai tác tử i và j được gọi là lân cận của nhau khi chúng có chung một cạnh $ed = (i, j)^e \in \mathcal{E}$, $i, j \in \mathcal{V}$ [14].

Mối quan hệ giữa các đỉnh và các cạnh trong đồ thị được mô tả dưới dạng ma trận. Các ma trận này có vai trò quan trọng trong việc mô tả cấu trúc liên kết của đồ thị đội hình [15]. Ma trận kề $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ biểu diễn mối quan hệ giữa các đỉnh của đồ thị $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, được xác định như sau:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{nếu } (i, j) \in \mathcal{E} \\ 0, & \text{nếu } (i, j) \notin \mathcal{E} \end{cases} \quad a_{ij} = a_{ji}, i \neq j, a_{ii} = 0 \quad (1)$$

Để mô tả một đội hình trong không gian Euclide d chiều ta sử dụng khái niệm khung (framework) của đội hình. Gọi $p_i \in \mathbb{R}^d$ là tọa độ vị trí của đỉnh thứ i trong một hệ quy chiếu cố định và cấu hình của đồ thị G được xác định bởi vector $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_n] \in \mathbb{R}^{dn}$ thì khung F của đội hình được xác định bởi một cặp $(G, \mathbf{p})$. Trong một khung đội hình $F = (G, \mathbf{p})$ ta sử dụng hàm cạnh [4]. Dựa trên thứ tự tùy ý của các cạnh trong $\mathcal{E}$, ta có hàm cạnh $\mathcal{H}_G(\mathbf{p}): \mathbb{R}^{dn} \rightarrow \mathbb{R}^m$ cho khung đội hình $F = (G, \mathbf{p})$ trong đó $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ được xác định như sau:

$$\mathcal{H}_G(\mathbf{p}) \triangleq [\dots, \|p_i - p_j\|^2, \dots], \quad (i, j) \in \mathcal{E} \quad (2)$$

Trong kỹ thuật điều khiển nhóm dựa trên biến khoảng cách, việc áp dụng lý thuyết đồ thị cứng giúp ta chọn được số biến khoảng cách và chọn các biến này như thế nào để khi các biến khoảng cách này thỏa mãn thì đội hình thu được chỉ sai khác đội hình đặt bởi một phép tịnh tiến hoặc một phép quay. Hai đội hình $(G, \mathbf{p})$ và $(G, \mathbf{q})$ được gọi là đẳng cấu trong $\mathbb{R}^d$ nếu chúng liên quan với nhau bằng một phép đẳng cự trong $\mathbb{R}^d$. Ta thấy rằng các khung đội hình đẳng cấu là tương đồng về khoảng cách. Ta ký hiệu tập hợp tất cả các đội hình đẳng cấu với F là $Iso(F)$. Ngược lại, nếu như hai đội hình là tương đương về khoảng cách nhưng không tương đồng thì chúng được gọi là những đội hình không rõ ràng, ta ký hiệu là $Amb(F)$ [5].

Một khung đội hình $F = (G, \mathbf{p})$ là cứng trong $\mathbb{R}^d$ nếu như tất cả các chuyển động của nó thỏa mãn $p_i(t) = \mathcal{T}(p_i), \forall i \in \mathcal{V}$, trong đó $\mathcal{T}$ mô tả chuyển động quay và/hoặc chuyển động tịnh tiến của vectơ vị trí p_i , tức là họ các khung $F(t)$ là đẳng cấu [16]. Thuộc tính độ cứng của khung F được đặc trưng bởi ma trận độ cứng $\mathcal{R}(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^{m \times dn}$

$$\mathcal{R}(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \frac{\partial \mathcal{H}_G(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} \quad (3)$$

Trong đó, $\mathcal{H}_G(\mathbf{p})$ được xác định theo (2). Một tập hợp con của độ cứng được gọi là độ cứng khoảng cách vi phân (infinitesimal rigidity), trong đó sự bảo toàn khoảng cách bậc một vẫn được duy trì trong một chuyển động vô cùng nhỏ. Độ cứng khoảng cách vi phân có thể được xác định dễ dàng thông qua hạng của ma trận độ cứng $\mathcal{R}(\mathbf{p})$. Theo [16], [17], dựa trên ma trận độ cứng, một khung đội hình $F = (G, \mathbf{p})$ là cứng khoảng cách vi phân trong $\mathbb{R}^d$ nếu và chỉ nếu:

$$\text{rank}(\mathcal{R}(\mathbf{p})) = dn - \frac{d(d+1)}{2} \quad (4)$$

Hai khung đội hình $F = (G, \mathbf{p})$ và $F' = (G, \mathbf{p}')$ xét hàm sau:

$$\Phi(F, F') = \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} (\|p_i - p_j\| - \|p'_i - p'_j\|)^2 \quad (5)$$

Nếu khung F' là cứng khoảng cách vi phân và $\Phi(F, F') \leq \varepsilon$ với ε là hằng số dương đủ nhỏ thì khung F cũng có độ cứng khoảng cách vi phân.

Rõ ràng rằng việc thêm các cạnh vào một đồ thị không phá hủy độ cứng trong khi việc loại bỏ các cạnh có thể ảnh hưởng đến việc đảm bảo độ cứng, do đó chúng ta có thêm khái niệm độ cứng tối thiểu (minimal rigidity). Một đồ thị G có độ cứng tối thiểu trong $\mathbb{R}^d$ nếu và chỉ nếu [17]:

$$m = dn - \frac{d(d+1)}{2} \quad (6)$$

Kết hợp phương trình (4) và (6) ta thấy rằng một khung đội hình F là cứng khoảng cách vi phân và tối thiểu khi $m = \text{rank}(\mathcal{R}(\mathbf{p})) = dn - \frac{d(d+1)}{2}$.

2.2. Phương pháp thiết kế luật điều khiển

2.2.1. Thiết kế luật điều khiển hình thành đội hình đặt

Xét một hệ đa tác tử gồm n tác tử, mỗi tác tử được mô tả bởi phương trình:

$$\dot{p}_i = u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Trong đó, $p_i \in \mathbb{R}^d$ là vị trí và $u_i \in \mathbb{R}^d$ là tín hiệu điều khiển vận tốc của tác tử thứ i . Gọi z_{ij} là vị trí tương đối (vector sai lệch vị trí) giữa tác tử i và tác tử j :

$$z_{ij} = p_i - p_j \quad (8)$$

Sai lệch khoảng cách tương đối giữa tác tử i và j với khoảng cách đặt được xác định như sau:

$$e_{ij} = \|z_{ij}\| - d_{ij}^* = d_{ij} - d_{ij}^* \quad (9)$$

Sai lệch bình phương khoảng cách tương đối giữa tác tử i và tác tử j với khoảng cách đặt:

$$\bar{e}_{ij} = d_{ij}^2 - (d_{ij}^*)^2 \quad (10)$$

$$\mathbf{z} = [\dots, z_{ij}, \dots] \in \mathbb{R}^{dm}, \mathbf{e} = [\dots, e_{ij}, \dots] \in \mathbb{R}^m, \bar{\mathbf{e}} = [\dots, \bar{e}_{ij}, \dots] \in \mathbb{R}^m, (i, j) \in \mathcal{E}$$

Kết hợp với phương trình hàm cạnh (4), ta có:

$$\bar{\mathbf{e}} = [\dots, \bar{e}_{ij}, \dots]^T = \mathcal{H}_G(\mathbf{p}) - \mathcal{H}_G(\mathbf{p}^*) \quad (11)$$

Để hình thành đội hình đặt, luật điều khiển phải có dạng như sau: $u_i = f_i(z_{ij}, d_{ij}^*), i = 1, \dots, n$ $j \in N_i$. Tín hiệu điều khiển u_i này sẽ trực tiếp điều khiển khoảng cách $\|p_i - p_j\|$ sao cho:

$$\|p_i(t) - p_j(t)\| \rightarrow d_{ij}^* \text{ khi } t \rightarrow \infty, (i, j) \in \mathcal{E} \quad (12)$$

Điều này tương ứng với:

$$\mathcal{H}_G(\mathbf{p}(t)) \rightarrow \mathcal{H}_G(\mathbf{p}^*) \text{ khi } t \rightarrow \infty \quad (13)$$

Quá trình thiết kế điều khiển cần khởi tạo các tác tử đủ gần với tập $Iso(F^*)$ và tránh khả năng $F(t) \rightarrow Amb(F^*)$ khi $t \rightarrow \infty$, điều này nghĩa là $dist(\mathbf{p}(0), Iso(F^*)) < dist(\mathbf{p}(0), Amb(F^*))$.

Chọn hàm thế từ hàm Lyapunov [18] kết hợp với phương trình (11), ta có:

$$\mathcal{L}(\bar{\mathbf{e}}) = \frac{1}{4} \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}^*} \bar{e}_{ij}^2 = \frac{1}{4} \bar{\mathbf{e}}^T \bar{\mathbf{e}} = \frac{1}{4} (\|\bar{\mathbf{e}}\|)^2 = \frac{1}{4} (\|\mathcal{H}_G(\mathbf{p}) - \mathcal{H}_G(\mathbf{p}^*)\|)^2 \quad (14)$$

Hàm $\mathcal{L}(\bar{\mathbf{e}})$ xác định dương tại $\mathbf{e}$. Đạo hàm theo thời gian phương trình (14) và kết hợp với các phương trình (3) và (7) ta được:

$$\dot{\mathcal{L}}(\bar{\mathbf{e}}) = \frac{1}{4} \frac{d}{dt} (\|\mathcal{H}_G(\mathbf{p}) - \mathcal{H}_G(\mathbf{p}^*)\|)^2 = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{e}}^T \frac{d(\mathcal{H}_G(\mathbf{p}))}{dt} = \bar{\mathbf{e}}^T \mathcal{R}(\mathbf{p}) \dot{\mathbf{p}} = \bar{\mathbf{e}}^T \mathcal{R}(\mathbf{p}) \mathbf{u} \quad (15)$$

Trong đó, $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_n] \in \mathbb{R}^{dn}$ là véc tơ xếp chồng của các đầu vào điều khiển. Luật điều khiển nhóm được đưa ra nhằm giải quyết vấn đề hình thành và duy trì đội hình đặt. Xét đội hình $F(t) = (G^*, \mathbf{p}(t))$ điều kiện đầu của động học sai số khoảng cách là $\mathbf{e}(0) \in Y_1 \cap Y_2$, trong đó:

$$Y_1 = \{\mathbf{e} \in \mathbb{R}^m \mid \Phi(F, F^*) \leq \varepsilon\} \quad (16)$$

$$Y_2 = \{\mathbf{e} \in \mathbb{R}^m \mid dist(\mathbf{p}(0), Iso(F^*)) < dist(\mathbf{p}(0), Amb(F^*))\} \quad (17)$$

ε là hằng số dương đủ nhỏ. Khi đó, luật điều khiển được xác định như sau:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_f := -k_p \mathcal{R}^T(\mathbf{p}) \bar{\mathbf{e}} \quad (18)$$

Trong đó, hệ số điều khiển $k_p > 0$, $\mathbf{u}_f$ được sử dụng để chỉ luật điều khiển hình thành đội hình. Ta có thấy rằng điều kiện ban đầu $\mathbf{e}(0) \in Y_1 \cap Y_2$ là điều kiện để đội hình $F(t)$ đảm bảo hai ràng buộc: Ràng buộc thứ nhất (16) đảm bảo độ cứng khoảng cách vi phân của đội hình $F(t)$ khi F^* có độ cứng khoảng cách vi phân theo phương trình (5). Ràng buộc thứ hai (17) giúp đội hình $F(t)$ tại thời điểm $t = 0$ gần với một đội hình nằm trong tập các đội hình đẳng cấu ($Iso(F^*)$) hơn là một đội hình nằm trong tập các đội hình không rõ ràng ($Amb(F^*)$) từ đó tránh việc hội tụ về một đội hình không rõ ràng.

Luật điều khiển trong (19) cũng có biểu diễn dưới dạng cho luật điều khiển cho từng tác tử thứ i như sau:

$$u_{fi} = -k_p \sum_{j \in N_i} z_{ij} \bar{e}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

2.2.2. Thiết kế luật điều khiển theo dõi và bao vây mục tiêu di động

Giả sử rằng chuyển động của mục tiêu $p_T(t)$ là khả vi liên tục. Trong bài toán này, tất cả các tác tử đều không có thông tin về vận tốc mục tiêu $v_T := \dot{p}_T$, tuy nhiên tác tử nhóm trưởng, gọi là tác tử thứ n , có thể đo được vị trí tương đối của mục tiêu $p_T - p_n$ bằng các cảm biến và có thể truyền thông tin này cho những tác tử thành viên theo dõi. Đặt e_T là sai lệch vị trí giữa mục tiêu và tác tử nhóm trưởng (còn gọi là sai lệch theo dõi mục tiêu):

$$e_T = p_T - p_n \quad (20)$$

Luật điều khiển tác tử i trong bài toán theo dõi và bao vây mục tiêu có dạng $u_i = f(z_{ij}, v_{ij}, d_{ij}^*, e_T, \hat{v}_T)$, $i = 1, \dots, n$, $j \in N_i$. Trong đó, $v_{ij} = v_i - v_j$ và $d_{ij}^* = \|p_i^* - p_j^*\|$ lần lượt sai lệch vận tốc và khoảng cách đặt giữa tác tử i và j , $\hat{v}_T$ là giá trị ước lượng của vận tốc của mục tiêu. Giá trị này được xác định bởi cơ chế ước lượng động liên tục [19]:

$$\hat{v}_T(t) = \int_0^t [k_1 e_T(\tau) + k_2 \text{sgn}(e_T(\tau))] d\tau \quad (21)$$

Trong đó, các hệ số $k_1, k_2 > 0$. Xét đội hình $F(t) = (G^*, p(t))$ với điều kiện đầu của động học sai số khoảng cách là $e(0) \in Y_1 \cap Y_2$. Khi đó, luật điều khiển bao vây mục tiêu có dạng sau:

$$u = u_f + 1_n \otimes \kappa \quad (22)$$

Trong đó, $u_f = [u_{f1}, \dots, u_{fn}]$ là tín hiệu điều khiển hình thành đội hình đặt được xây dựng như trong (18) và thành phần điều khiển bao vây mục tiêu $\kappa \in \mathbb{R}^d$ được xác định bởi:

$$\kappa = k_1 e_T + \hat{v}_T - u_{fn} \quad (23)$$

Trong đó, u_{fn} là tín hiệu điều khiển hình thành đội hình của tác tử nhóm trưởng. Vận tốc của mục tiêu được xác định sao cho $(v(t) - \hat{v}_T(t)) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$. Từ phương trình (22) và (23) ta có luật điều khiển theo dõi mục tiêu cho tác tử nhóm trưởng $u_n \in \mathbb{R}^d$ có dạng như sau:

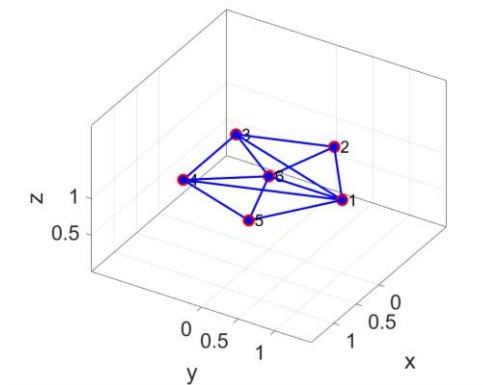
$$u_n = k_1 e_T + \hat{v}_T \quad (24)$$

Từ các phương trình (19), (21), (22) và (23) luật điều khiển cho tác tử thành viên thứ $u_i \in \mathbb{R}^d$ có dạng như sau:

$$\begin{aligned} u_i &= u_{fi} + \kappa \\ &= -k_p \sum_{j \in N_i} z_{ij} \bar{e}_{ij} + k_1 e_T + \int_0^t [k_1 e_T(\tau) + k_2 \text{sgn}(e_T(\tau))] d\tau + k_p \sum_{j \in N_n} z_{nj} \bar{e}_{nj} \end{aligned} \quad (25)$$

($i = 1, \dots, n - 1$)

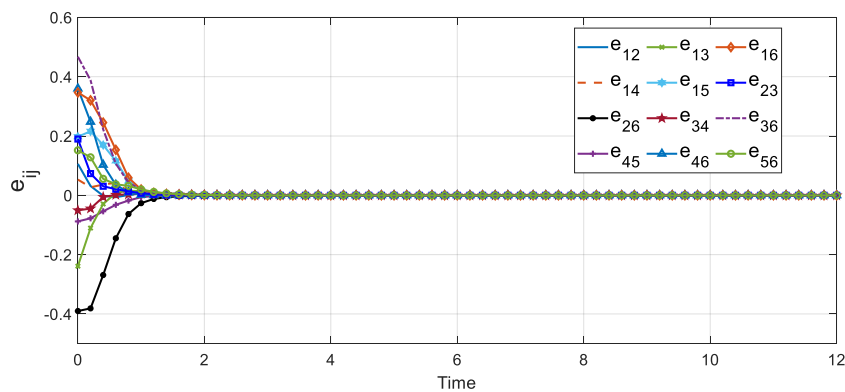
3. Kết quả mô phỏng và đánh giá



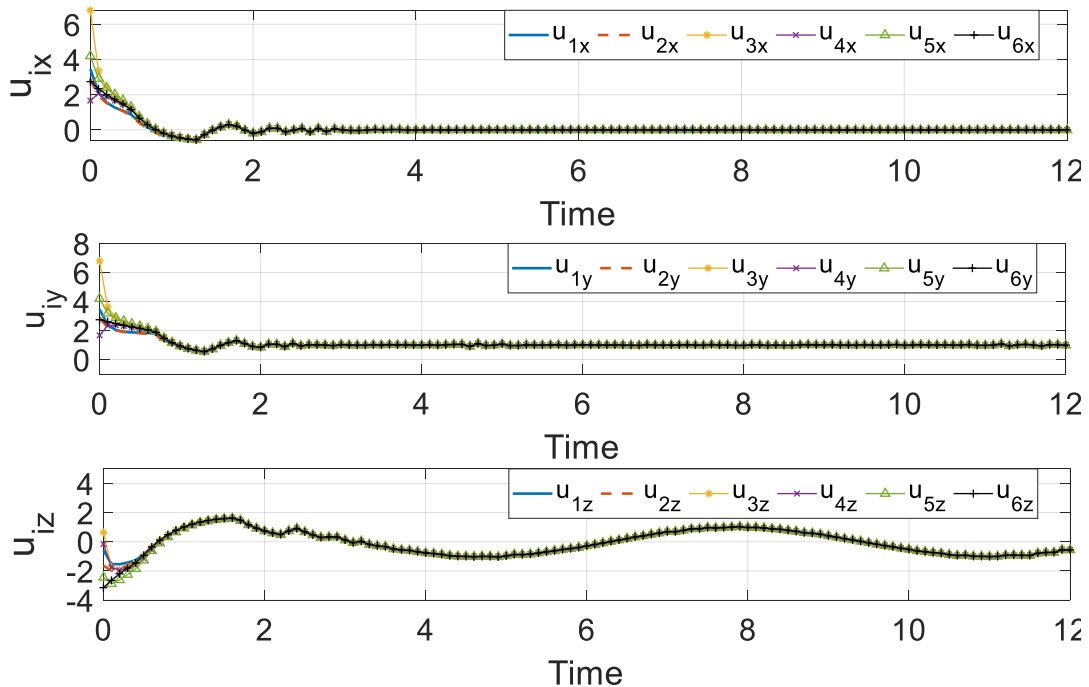
Hình 2. Đội hình đặt trong không gian 3 chiều

Tiến hành mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab để kiểm chứng luật điều khiển nhóm theo dõi và bao vây mục tiêu trong không gian 3 chiều $\mathbb{R}^3$ ($d = 3$). Hệ gồm sáu tác tử ($n = 6$) được thiết

lập đội hình đặt với năm tác tử thành viên tạo thành cấu trúc ngũ giác ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) và một tác tử thứ sáu đóng vai trò nhóm trưởng nằm ở tâm của đội hình ngũ giác. Khi đó, để đảm bảo độ cứng khoảng cách vị phân và tối thiểu của đồ thị đội hình trong không gian ba chiều thì số cạnh liên kết là $m = 12$, đồ thị đội hình đặt được mô tả như hình 2. Tính toán các ma trận đội hình $\mathcal{A}_{6 \times 6}$ theo phương trình (1) và ma trận cứng $\mathcal{R}_{12 \times 18}$ theo phương trình (3). Khoảng cách giữa các tác tử được thiết lập như sau $d_{12}^* = d_{15}^* = d_{23}^* = d_{34}^* = d_{45}^* = \sqrt{2(1 - \cos(2\pi/5))}$; $d_{13}^* = d_{12}^* = \sqrt{2(1 + \cos(\pi/5))}$. Khoảng cách giữa tác tử thành viên và nhóm trưởng là $d_{16}^* = d_{26}^* = d_{36}^* = d_{46}^* = d_{56}^* = 1$. Các vị trí đầu của các tác tử lần lượt được đặt ngẫu nhiên bởi: $p_i(0) = p_i^* + [\text{rand}(0,1) - 0.5I_2]$. Hệ số $\delta = 1$ và giá trị ước lượng vận tốc đầu $\hat{v}_T(0) = 0$. Mục tiêu di động có vị trí ban đầu là $p_T(0) = [0, 2, 0]$ và chuyển động với vận tốc là $v_T = [0, 1, \sin t]$.

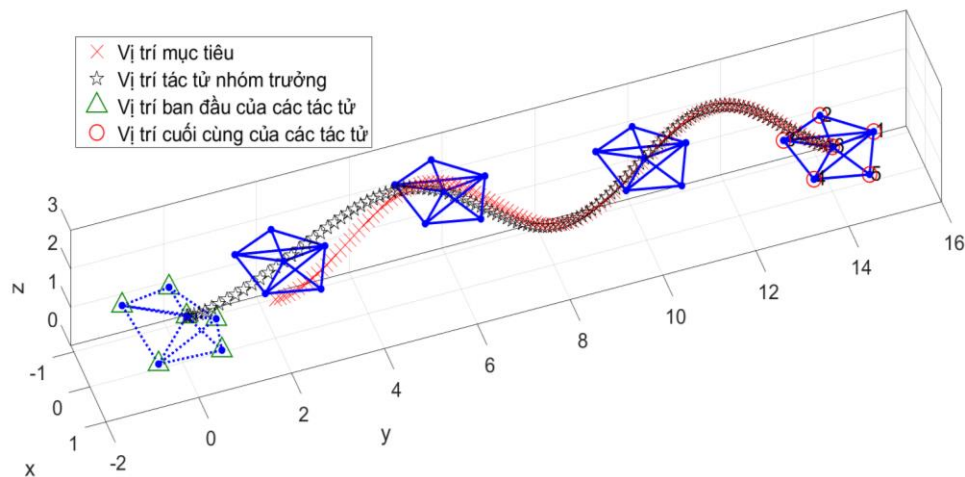


Hình 3. Các sai lệch e_{ij}



Hình 4. Các tín hiệu điều khiển u_{ix} , u_{iy} và u_{iz}

Kết quả mô phỏng trong hình 3 mô tả các sai lệch khoảng cách giữa các tác tử e_{ij} điều hội tụ về 0 tức là hệ đa tác tử đã hình thành được đội hình đặt và duy trì trong suốt quá trình hệ theo dõi và bao vây mục tiêu. Hình 4 thể hiện các đầu vào điều khiển của mỗi tác tử $u_i = [u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}]$ điều hội tụ về giá trị $v_T = [0, 1, \sin t]$ mặc dù tất cả các tác tử trong đội hình đều không có thông tin về vận tốc của mục tiêu. Kết quả trong hình 5 mô tả quá trình hình thành đội hình đặt, theo dõi và bao vây mục tiêu động của hệ đa tác tử khi áp dụng thuật toán đề xuất, tác tử nhóm trưởng bám quỹ đạo của mục tiêu di động và những tác tử thành viên theo dõi tác tử nhóm trưởng đồng thời bao vây được mục tiêu theo đội hình đặt, không xảy ra sự biến dạng đội hình trong quá trình di chuyển.



Hình 5. Đội hình $F(t)$ theo dõi và bao vây mục tiêu di động trong khi vẫn duy trì đội hình đặt

4. Kết luận và hướng phát triển

Nghiên cứu này đã đưa ra luật điều khiển mới trong thiết kế thuật toán điều khiển nhóm cho hệ đa tác tử dựa trên cơ sở của lý thuyết đồ thị cứng, ứng dụng trong nhiệm vụ theo dõi và bao vây một mục tiêu di động. Đội hình đặt được mô tả dưới dạng đồ thị vô hướng có độ cứng khoảng cách vi phân và tối thiểu. Theo đó, việc xây dựng luật điều khiển dựa trên ma trận độ cứng nhằm đưa khoảng cách giữa các tác tử đến khoảng cách đặt. Luật điều khiển bao gồm thành phần điều khiển hình thành đội hình và cơ chế điều khiển theo dõi và bao vây mục tiêu. Thành phần điều khiển đầu tiên mang tính chất phân tán mạnh mẽ vì nó chỉ phụ thuộc vào thông tin của bản thân tác tử và các tác tử lân cận, trong khi đó thành phần điều khiển thứ hai cần các thông tin truyền từ tác tử nhóm trưởng đến những tác tử thành viên, tuy nhiên nó vẫn đảm bảo được các tính chất của một bộ điều khiển nhóm phân tán do tác tử nhóm trưởng cũng là một lân cận của các tác tử còn lại. Thuật toán điều khiển đề xuất đã được kiểm chứng tính hiệu quả thông qua các kết quả mô phỏng trong không gian ba chiều trên phần mềm Matlab.

Trong bài viết này, các tác giả đã xây dựng thuật toán điều khiển nhóm nhằm mô tả sự tương tác giữa các tác tử trong hệ, trong đó mỗi tác tử được biểu diễn dưới dạng động học chất điểm. Điều này tạo cơ sở cho việc phát triển các thuật toán điều khiển nhóm dựa trên lý thuyết đồ thị cứng ứng dụng cho mô hình động lực học của hệ thống đa robot, hệ thiết bị không người lái trong các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Tác giả Nguyễn Thị Tuyết Hoa được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2022.TS044.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] X. Wang, Z. Zeng, and Y. Cong, "Multi-agent distributed coordination control: Developments and directions via graph viewpoint," *Neurocomputing*, vol. 199, pp. 204-218, 2016.
- [2] W. Yu, G. Wen, G. Chen, and J. Cao, *Distributed cooperative control of multi-agent systems*. John Wiley & Sons, 2017.
- [3] M. T. Nguyen, C. V. Nguyen, H. T. Do, H. T. Hua, T. A. Tran, A. D. Nguyen, G. Ala, and F. Viola, "Uav-assisted data collection in wireless sensor networks: A comprehensive survey," *Electronics*, vol. 10, no. 21, 2021, Art. no. 2603.
- [4] A. Altan and R. Hacıoglu, "Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on UAV for real-time target tracking under external disturbances," *Mech. Syst. Signal Process*, vol. 149, pp. 270–299, 2020.
- [5] H. S. Ahn, *Formation control*. Springer International Publishing, 2020.
- [6] K.-K. Oh, M.-C. Park, and H.-S. Ahn, "A survey of multi-agent formation control," *Automatica*, vol. 53, pp. 424-440, 2015.
- [7] F. Michaud and M. Nicolescu, "Behavior-based systems," in *Handbook of Robotics*, Springer, 2016, pp.307–328.
- [8] G. Lee and D. Chwa, "Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance," *Intelligent Service Robotics*, vol. 11, pp. 127–138, 2018.
- [9] H. T. Do, H. T. Hua, M. T. Nguyen, C. V. Nguyen, H. T. Nguyen, H. T. Nguyen, and N. T. Nguyen, "Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 27, pp. 1 – 13 , 2021.
- [10] V. Roldão, R. Cunha, D. Cabecinhas, C. Silvestre, and P. Oliveira, "A leader-following trajectory generator with application to quadrotor formation flight," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 10, pp. 1597–1609, 2014.
- [11] C. K. Peterson and J. Barton, "Virtual structure formations of cooperating uavs using wind compensation command generation and generalized velocity obstacles," in *2015 IEEE Aerospace Conference*, 2015, pp. 1–7.
- [12] D. Zhou, Z. Wang, and M. Schwager, "Agile coordination and assistive collision avoidance for quadrotor swarms using virtual structures," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 916–923, 2018.
- [13] H. T. Do, H. T. Hua, H. T. Nguyen, M. T. Nguyen, and H. T. Tran, "Cooperative tracking framework for multiple unmanned aerial vehicles (uavs)," in *Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications*, ICERA 2021, Springer, 2022, pp. 276–285.
- [14] W. Ren and Y. Cao, *Distributed coordination of multi-agent networks: emergent problems, models, and issues*, London: Springer-Verlag, 2011.
- [15] H. Do, H. Nguyen, C. Nguyen, M. Nguyen, and M. Nguyen, "Formation control of multiple unmanned vehicles based on graph theory: A comprehensive review," *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications*, vol. 7, no. 3, pp. 1 – 9, 2022.
- [16] I. Izmestiev, "Infinitesimal rigidity of frameworks and surfaces," *Lectures on Infinitesimal Rigidity*, Kyushu University, Japan, 2009.
- [17] B. D. O. Anderson, C. Yu, B. Fidan, and J. M. Hendrickx, "Rigid graph control architectures for autonomous formations," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 28, no. 6, pp. 48–63, 2008.
- [18] F. Dörfler and B. Francis, "Geometric analysis of the formation problem for autonomous robots," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. 55, no. 10, pp. 2379–2384, 2010.
- [19] B. Xian, D. M. Dawson, M. de Queiroz, and J. Chen, "A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems," *IEEE Trans. Autom. Contr.*, vol. 49, no.7, pp. 1206–1211, 2004.