

NGHIÊN CỨU THUẬT TOÁN HỢP TÁC “LEADER – FOLLOWER” ÚNG DỤNG TRONG HỆ THỐNG ROBOT DI ĐỘNG

RESEARCH ON LEADER - FOLLOWER COOPERATIVE CONTROL IN MULTIPLE MOBILE ROBOTS SYSTEMS

Ngô Thị Xuân Thành¹, Nguyễn Tân Thuyền², Lê Minh Tú³, Trần Thị Minh Dung⁴

^{1, 2, 3, 4} Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng.

Email: [1xuanthanh2357@gmail.com](mailto:lxuanthanh2357@gmail.com), 2nguyentanthuyen.tdhclc@gmail.com, 3tlminh878@gmail.com,
4ttmdung@ut.udn.vn

Tóm tắt – Bài báo này nghiên cứu thuật toán điều khiển hợp tác “leader-follower” trong hệ thống đa đối tượng, áp dụng cụ thể cho hệ các robots di động. Tùy theo mục đích và yêu cầu của nhiệm vụ, các robots “followers” duy trì khoảng cách tương đối với robot “leader” để giữ đội hình không đổi hoặc tạo thành một số dạng hình học mong muốn. Cũng trong bài báo này, nhóm tác giả xây dựng mô hình hệ thống các robot di động và truyền thông giữa chúng để đánh giá tính hiệu quả của thuật toán hợp tác “leader-follower”.

Abstract - This paper studies leader-follower cooperative control algorithm in multi-agent systems such as a multiple mobile robot system. Based on the purpose of a task, it may require the follower robots to keep the relative distance from the leader robot in order to perform a formation or some predefined geometric patterns. Therefore, this paper not only represents the control diagram of each mobile robot but also digs in the communication scheme among them to reach the cooperative purpose of the system. A mini mobile robot system has been built to validate the performance of the algorithm with two tasks including cooperative transport and searching mission.

Từ khóa - (cooperative control, formation control, leader-follower, multiple mobile robots, consensus protocol)

Keywords - (cooperative control, formation control, leader-follower, multiple mobile robots, consensus protocol)

1. Giới thiệu chung.

Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ tự động hóa, robot đã và đang ngày càng hoàn thiện hơn khi có thể thực hiện các công việc phức tạp và có độ chính xác cao. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, việc sử dụng một robot riêng lẻ để hoàn thành công việc là bất khả thi như nâng một vật nặng hay phối hợp trong các tác vụ ở những vị trí khác nhau. Điều này đặt ra vấn đề cần phải phối hợp nhiều robot, hợp tác cùng nhau trong các nhiệm vụ. Chính vì vậy điều khiển hợp tác (cooperative control) đã và đang trở thành một trong những hướng nghiên cứu thu hút nhiều sự quan tâm từ cộng đồng các nhà khoa học trong những năm qua. Việc phối hợp một nhóm các thiết bị thông minh như robot làm việc cùng nhau có lợi thế tiềm năng hơn khi có thể thực hiện các nhiệm vụ có tính chất phức tạp mà một robot không thể thực hiện được như: giám sát đa điểm, lập bản đồ, tìm kiếm, vận chuyển hợp tác hay trình diễn nghệ thuật [1], [2].

Hai cấu trúc điều khiển được áp dụng trong điều khiển hợp tác là cấu trúc điều khiển tập trung và cấu trúc điều khiển phân tán. Trong cấu trúc điều khiển tập trung, một nhóm các thiết bị như robot được điều khiển thông qua một trạm xử lý trung tâm, trong đó các camera giám sát, định vị các robot và gửi dữ liệu về máy tính. Cấu trúc này dễ dàng thực hiện với một nhóm các robot có kích thước nhỏ, tuy nhiên sẽ gây những hạn chế nhất định khi mở rộng với số lượng robot lớn hơn. Với cấu trúc điều khiển phân tán, mỗi robot được điều khiển độc lập thông qua dữ liệu được gửi đến từ robot lân cận. Mặc dù cả hai cấu trúc trên đều có thể được áp dụng tùy thuộc vào mục đích ứng dụng cũng như điều khiển thí nghiệm thực tế, tuy nhiên vì những hạn

chế về vật lý là không thể tránh khỏi như nguồn tài nguyên, năng lượng, giới hạn truyền thông,... cấu trúc điều khiển phân tán được cho là hứa hẹn và được áp dụng phổ biến hơn trong nghiên cứu điều khiển hợp tác hệ robot di động.

Có thể thấy, điều khiển hợp tác một hệ thống đa đối tượng đặt ra nhiều thách thức không những nghiên cứu về mặt lý thuyết mà còn thực tiễn. Để sự hợp tác đạt được kết quả, có rất nhiều vấn đề cần được giải quyết mà sự đồng thuận về thông tin giữa các đối tượng là một trong những vấn đề quan trọng, và là cơ sở chính được nghiên cứu trong hầu hết các lĩnh vực điều khiển hợp tác [3, 4, 5, 6, 7]. Trong một hệ đa đối tượng được kết nối, thuật toán đồng thuận được áp dụng để trao đổi thông tin giữa các phần tử lân cận nhằm cập nhật thông tin của cả hệ thống [8]. Như vậy, mục tiêu chính của điều khiển hợp tác là xây dựng một chiến lược điều khiển phân tán, cho phép mỗi phần tử xác định tín hiệu điều khiển dựa trên thông tin được cung cấp bởi các phần tử lân cận, để hệ đạt được mục tiêu chung mong muốn [9]. Tùy theo mục đích ứng dụng và tính chất của đối tượng trong hệ, những thông tin này có thể là vị trí tương đối, vận tốc, góc lệch hay độ cao, v.v.

Một trong những nghiên cứu dựa trên sự đồng thuận là bài toán điều khiển đội hình (formation control). Nhờ phạm vi ứng dụng rộng rãi, điều khiển đội hình là một trong những hướng nghiên cứu nhận được nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực điều khiển hợp tác. Mục tiêu chính của điều khiển đội hình là phối hợp một nhóm các thiết bị thông minh như robot tạo thành một số dạng hình học mong muốn, để một số nhiệm vụ có thể được hoàn thành nhờ sự cộng tác của các robot [9, 10]. Ba phương pháp điều khiển phổ biến trong điều khiển đội hình là: điều khiển dựa vào

hành vi “behavior-based” [11, 12, 13], điều khiển theo kiểu dẫn đầu – tùy theo “leader-follower” [14, 15, 16, 17, 18, 19], điều khiển theo cấu trúc ảo “virtual structure” [20, 21, 22, 23]. Trong phương pháp điều khiển “behavior-based”, một số hành vi mong muốn (tránh vật cản, tránh va chạm,...) được chỉ định cho mỗi robot và hành động cuối cùng của nhóm robot được quyết định bởi “tâm quan trọng tương đối” của từng hành vi. Nhược điểm của phương pháp này là khó mô tả chính xác động lực học và đảm bảo sự ổn định của toàn hệ thống. Trong điều khiển theo cấu trúc ảo, đội hình robot được xem như một cấu trúc vật lý (hình vuông, hình tròn,...) và quỹ đạo tham chiếu của mỗi robot phụ thuộc vào chuyển động của tâm điểm ảo. Ưu điểm của phương pháp này là tính bền vững và bởi sự ràng buộc chặt chẽ giữa các robot trong đội hình. Nhược điểm của cả hai phương pháp trên thường sử dụng cấu trúc điều khiển tập trung, do vậy sẽ gây nên những hạn chế trong một số ứng dụng. Với phương pháp điều khiển “leader-follower”, một hay một số robot sẽ được chỉ định là robot “dẫn đầu” (leader), di chuyển theo quỹ đạo được định trước. Các robot “tùy theo” (followers) di chuyển duy trì khoảng cách và góc lệch tương đối với robot dẫn đầu để giữ đội hình không đổi. Ưu điểm của điều khiển “leader-follower” so với hai phương pháp trên là dễ tiếp cận và thực hiện nhờ áp dụng cấu trúc điều khiển phân tán nên không yêu cầu các thiết bị định vị và giám sát. Tuy nhiên, nhược điểm dễ thấy là không có phản hồi từ các robot tùy theo gửi về cho robot dẫn đầu. Do vậy, nếu robot tùy theo bị tác động bởi nhiều, đội hình sẽ không còn được duy trì.

Bài báo này tập trung nghiên cứu điều khiển hợp tác ứng dụng cho hệ thống robot di động. Bố cục của bài báo như sau: mục 2 trình bày khái niệm chung về lý thuyết đồ thị và cơ sở thuật toán đồng thuận trong hệ đa đối tượng. Mô hình động học, động lực học và điều khiển chuyên động robot di động được trình bày trong mục 3. Thuật toán điều khiển đội hình leader-follower ứng dụng thuật toán đồng thuận được mô tả trong mục 4. Mục 5 trình bày một số mô phỏng khi phối hợp một nhóm robot trong các ứng dụng hợp tác như vận chuyển vật và tìm kiếm. Mục 6 đề xuất mô hình hai robot di động được sử dụng trong thí nghiệm thực tế. Kết luận và hướng phát triển của đề tài được trình bày trong mục 7.

2. Khái niệm chung.

2.1. Lý thuyết đồ thị (Graph Theory).

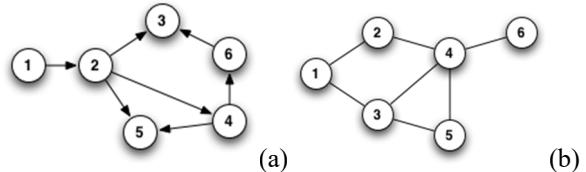
Sự trao đổi thông tin là nền tảng trong nghiên cứu điều khiển hợp tác hệ đa đối tượng, và lý thuyết đồ thị là một công cụ hữu ích được sử dụng để phân tích sự tương tác, hay sơ đồ truyền thông giữa các phần tử được kết nối trong một mạng lưới. Xét một hệ đa đối tượng, sự trao đổi thông tin giữa các phần tử được mô tả bởi một đồ thị, trong đó mỗi nút (node) tượng trưng cho một phần tử và kết nối giữa hai phần tử lân cận được biểu diễn bởi một biên (link). Một đồ thị $G_n \triangleq (V_n, E_n)$ được định nghĩa gồm

$V_n = \{1, \dots, n\}$ là tập hợp vô hạn khác rỗng các phần tử và

$E_n \subseteq V_n \times V_n$ là tập hợp các biên của đồ thị. Ở đây ta giả định rằng, kết nối giữa các phần tử được thiết lập bởi kết

nối vật lý, dữ liệu được đo và trao đổi thông qua cảm biến và thiết bị truyền thông trên mỗi phân tử.

Tùy thuộc vào đường truyền của tín hiệu mà ta có đồ thị có hướng (directed graph) và đồ thị vô hướng (undirected graph). Một đồ thị được gọi là có hướng nếu $V_n = \{1, \dots, n\}$ là một tập hợp vô hạn khác rỗng các nút và $E_n \subseteq V_n \times V_n$ là tập hợp có thứ bậc các biên được tạo bởi một cặp nút. Một biên $(j, i) \in E_n$ biểu thị rằng phần tử i nhận dữ liệu được gửi đến từ phần tử j nhưng dữ liệu không được nhận theo chiều ngược lại. Nút j được gọi là nút mẹ (parent) và i được gọi là nút con (child) (hình 1-a). Khi đó, j được gọi là phần tử lân cận (neighbor) của i và tập hợp các phần tử lân cận của i được định nghĩa là N_i .



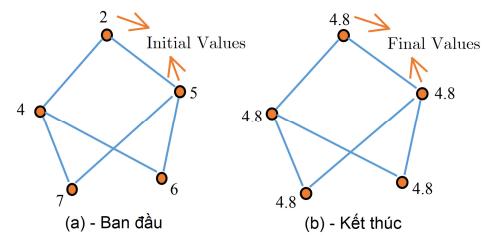
Hình 1. Đồ thị có hướng (a) và đồ thị vô hướng (b).

Trong đồ thị vô hướng, không tồn tại thứ bậc giữa mỗi cặp phần tử, nghĩa là các phần tử i và j có thể tiếp nhận thông tin lẫn nhau, hay thông tin được nhận theo hai chiều (hình 1-b). Để ý rằng, một đồ thị vô hướng có thể xem như trường hợp đặc biệt của đồ thị có hướng, trong đó mỗi biên (i, j) trong đồ thị vô hướng tương ứng với các biên (i, j) và (j, i) trong đồ thị có hướng.

Một cây có hướng (directed tree) là một đồ thị có hướng, trong đó mỗi nút ngoại trừ rễ (root) đều có một nút mẹ. Một cây mở rộng có hướng (directed spanning tree) trong đồ thị có hướng là một cây có hướng được tạo bởi các biên liên kết tất cả các nút. Một đồ thị có hướng được gọi là có một cây mở rộng với rễ tại nút i nếu luôn có một đoạn thẳng có hướng nối từ nút i đến mọi nút khác. Như vậy, trong đội hình leader-follower, cấu trúc đồ thị truyền thông phân tán có thể xem như là một cây mở rộng có hướng với leader chính là rễ.

2.2. Thuật toán đồng thuận (Consensus).

Vấn đề đồng thuận trong mạng lưới các phần tử được kết nối đã được nghiên cứu trong lĩnh vực khoa học và kỹ thuật máy tính. Thông qua giao thức đồng thuận, mỗi phần tử trong hệ cập nhật thông tin được gửi đến từ phần tử lân cận, để từ các giá trị ban đầu, các phần tử cùng đạt sự đồng nhất về thông tin (hình 2) [24, 25, 26, 27].



Hình 2. Đồng thuận thông tin trong một mạng lưới [26].

Một cách tổng quát, thuật toán đồng thuận được phân loại thành thuật toán đồng thuận rời rạc (discrete-time) và thuật toán đồng thuận liên tục (continuous-time). Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu ở thuật toán đồng thuận rời rạc và trình bày ngắn gọn về vấn đề đồng thuận trong hệ thống đa đối tượng dựa trên những kết quả đã được nghiên cứu.

Xét một hệ đa đối tượng và sự trao đổi thông tin trong hệ được biểu diễn bởi đồ thị $G_n(V_n, E_n)$ với $\xi_i \in \mathbb{R}^n$ là trạng thái thông tin của phần tử thứ i . Động học nút của phần tử thứ i được biểu diễn bởi:

$$\xi_i[k+1] = \xi_i[k] + \tau u_i[k] \quad (1)$$

Trong đó u_i là tín hiệu điều khiển, $\tau > 0$ là thời gian lấy mẫu (time-step).

Khi đó, thuật toán đồng thuận rời rạc tổng quát được xác định bởi:

$$u_i = -\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\xi_i[k] - \xi_j[k]) \quad (2)$$

Hay:

$$\xi_i[k+1] = \xi_i[k] + \tau \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\xi_j[k] - \xi_i[k]) \quad (3)$$

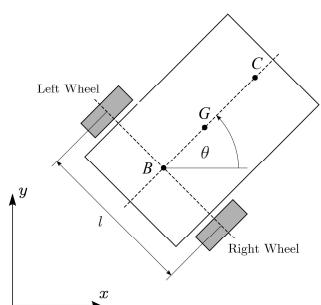
Với N_i là tập hợp các phần tử lân cận của nút i .

Từ phương trình (2) ta thấy rằng, sự đồng thuận trong hệ đạt được (tiệm cận) khi các phần tử cùng đạt một giá trị chung về trạng thái, nghĩa là $\forall i, j = 1, \dots, n, i \neq j, \xi_i[k] \rightarrow \xi_j[k]$ với mọi $\xi_i(0)$ hay $\|\xi_i[k] - \xi_j[k]\| \rightarrow 0$ khi $k \rightarrow \infty$.

3. Mô hình toán học và điều khiển chuyển động robot.

3.1. Mô hình động học robot.

Trong mục này ta xét đến mô hình động học của robot. Robot được sử dụng là loại chuyển động dựa trên hai bánh xe được điều khiển độc lập và một bánh lái. Chuyển động của robot được phân tích thông qua chuyển động của khối tâm robot. Giả thiết rằng robot chuyển động không trượt, môi trường không có vật cản và không có nhiễu tác động lên robot.



Hình 3. Mô hình động học robot di động.

Xét hệ tọa độ xOy cố định gắn với mặt phẳng chuyển động. Vị trí của robot được mô tả bởi vector trạng thái $\mathbf{p} = [x \ y \ \theta]^T$, trong đó (x, y) là tọa độ của robot, θ là

góc định hướng chuyển động (hình 3).

Phương trình động học mô tả chuyển động của robot:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (4)$$

Hay biểu diễn dưới dạng ma trận $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}(\theta)\mathbf{u}$:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó $\mathbf{u} = (v, \omega)^T$ là tín hiệu điều khiển, gồm hai thành phần $v[m/s]$, $\omega[rad/s]$ là vận tốc và vận tốc góc của robot.

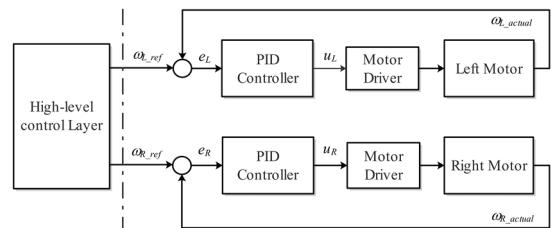
Ngoài ra, mối quan hệ giữa vận tốc và vận tốc góc của robot với tốc độ góc của hai bánh xe được xác định bởi:

$$\begin{cases} v = \frac{r(\omega_R + \omega_L)}{2} \\ \omega = \frac{r(\omega_R - \omega_L)}{l} \end{cases} \quad (6.a); \quad \begin{cases} \omega_R = \frac{v}{r} + \frac{l\omega}{2r} \\ \omega_L = \frac{v}{r} - \frac{l\omega}{2r} \end{cases} \quad (6.b)$$

Trong đó $\omega_R[rad/s]$, $\omega_L[rad/s]$ là tốc độ góc của bánh phải và bánh trái; $r[m]$ là bán kính bánh xe; $l[m]$ là khoảng cách giữa hai bánh.

3.2. Sơ đồ điều khiển của một robot.

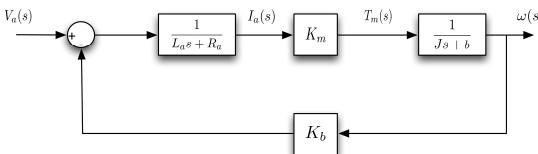
Hình 4 mô tả sơ đồ cấu trúc điều khiển của một robot.



Hình 4. Sơ đồ khái niệm điều khiển tốc độ động cơ.

Cơ cấu truyền động chính của robot là động cơ điện một chiều. Trong đó, các tín hiệu đặt vào mỗi động cơ là các giá trị tốc độ tham chiếu tương ứng với vận tốc và vận tốc góc của robot thông qua phép biến đổi (6.b). Nhằm điều khiển chính xác tốc độ thực tế của robot, bộ điều khiển PID được sử dụng để điều khiển tốc độ động cơ. Về cấu trúc điều khiển, mỗi robot được phân thành hai lớp: lớp điều khiển cấp cao (high-level control layer) và lớp điều khiển cấp thấp (low-level control layer). Lớp điều khiển cấp cao đặt ra các vận tốc mong muốn cho robot và gửi đến lớp điều khiển cấp thấp thực thi bộ điều khiển PID điều khiển tốc độ động cơ.

Xét động cơ điện một chiều có sơ đồ khái niệm:



Hình 5. Sơ đồ khái niệm cơ điện một chiều.

Khi đó, hàm truyền đạt của động cơ điện một chiều với đầu vào tốc độ và đầu ra là điện áp được xác định:

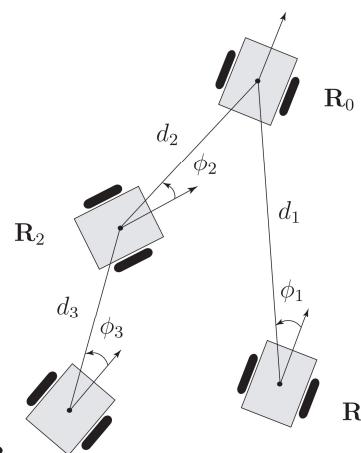
$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(Js + b) + K_m K_b} \quad (7)$$

Trong đó: $\omega [rad / s]$ là tốc độ động cơ, $v_a [V]$ là điện áp đặt vào động cơ, $i_a [A]$ là dòng điện mạch phần ứng, $R_a [\Omega]$ là điện trở phần ứng, $L_a [H]$ là điện cảm phần ứng, $J [kg.m^2 / rad]$ là momen quán tính rotor, $b [N.m]$ là hệ số ma sát nhót, $K_b [V.s / rad]$ là hằng số back-emf, $K_m [N.m.A^{-1}]$ là hằng số momen.

4. Điều khiển đội hình leader-follower ứng dụng thuật toán đồng thuận.

4.1. Giản đồ điều khiển.

Như đã giới thiệu trong mục 2, trong một hệ đa đối tượng, sự trao đổi thông tin giữa các phần tử được mô tả dưới dạng đồ thị. Trong đội hình leader-follower, mỗi robot được xem là một nút và kết nối giữa hai robot lân cận được biểu diễn bởi một biên. Cấu trúc đồ thị truyền thông phân tán của đội hình có thể xem như là một cây mở rộng có hướng với leader chính là rễ. Với một đội hình có hình dạng được định nghĩa, độ dài biên thể hiện sự ràng buộc giữa các robot được kết nối và mục tiêu của luật điều khiển là giữ vững sự ràng buộc ấy. Từ một cặp “leader-follower”, ta mở rộng đội hình theo thứ bậc (hierarchical formation) với các “leader” phụ và chuyển động của “follower” phụ thuộc vào “leader” tương ứng của nó. Như vậy, trong đội hình có thể có nhiều “leader”, nhưng chỉ \mathbf{R}_0 là “leader” chính. Khi đó ta có đồ thị hình cây với \mathbf{R}_0 là gốc [14, 16, 28] (hình 6).



Hình 6. Điều khiển đội hình leader-follower [28].

4.2. Thuật toán điều khiển đội hình leader-follower.

Đã có nhiều thuật toán điều khiển leader-follower được nghiên cứu và đề xuất. Mỗi thuật toán có những ưu điểm và nhược điểm riêng. Với điều khiển đội hình cho hệ robot di động, chúng tôi lựa chọn thuật toán được giới thiệu trong tài liệu [17, 18, 19] làm hướng nghiên cứu bởi tính đơn giản và hiệu quả ứng dụng cao.

Đặt các bộ số cho trước $\mathbf{D} = \{d_i : d_i > 0, i = 1, \dots, n\}$

và $\Phi = \left\{ \phi_i : |\phi_i| < \frac{\pi}{2}, i = 1, \dots, n \right\}$. Đặt $n_i, i = 1, \dots, n$ sao cho $n_i \in \{0, \dots, i-1\}$. Một nhóm gồm $(n+1)$ robot $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_n$ tạo thành đội hình (\mathbf{D}, Φ) tương ứng với các leaders $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_{n_1}, \dots, \mathbf{R}_{n_n}$ nếu $\forall t \geq 0, i = 1, \dots, n :$

$$\begin{pmatrix} x_{n_i} \\ y_{n_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + d_i \begin{pmatrix} \cos(\theta_i + \phi_i) \\ \sin(\theta_i + \phi_i) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Trong đó, các khoảng cách d_i và góc lệch ϕ_i giữa mỗi cặp robot được định nghĩa:

$$d_i = \|\mathbf{R}_{n_i} - \mathbf{R}_i\| = \sqrt{(x_{n_i} - x_i)^2 + (y_{n_i} - y_i)^2} \quad (9)$$

$$\phi_i = \arg(\mathbf{R}_{n_i} - \mathbf{R}_i) - \theta_i = \arctan\left(\frac{y_{n_i} - y_i}{x_{n_i} - x_i}\right) - \theta_i \quad (10)$$

Để ý rằng, đội hình tồn tại khi các khoảng cách d_i giữa mỗi cặp “leader-follower” phải thỏa điều kiện $d_i \geq d_{min} > 0$, với d_{min} là khoảng cách an toàn tối thiểu để tránh xảy ra va chạm nội giữa các robot. Luật điều khiển được xây dựng lần lượt theo hai trường hợp: các robot xuất phát ở vị trí ban đầu tạo thành một đội hình và được mở rộng cho trường hợp ban đầu các robot ở vị trí tùy ý.

Giả sử tại thời điểm ban đầu $t = 0$, các robot xuất phát ở những vị trí mà tại đó chúng tạo thành một đội hình $(\mathbf{D}^{ref}, \Phi^{ref})$. Khi đó, có thể xem các robot tạo thành đội hình (\mathbf{D}, Φ) với $\forall t \geq 0$ nếu các giá trị trong bộ số (\mathbf{D}, Φ) được giữ không đổi theo thời gian. Như vậy, yêu cầu đặt ra là tìm một luật điều khiển cho các robot follower phụ thuộc vào chuyển động của leader tương ứng để các phương trình thỏa mãn với mọi t , nghĩa là các giá trị d_i và ϕ_i được giữ gần đúng với giá trị tham chiếu d_i^{ref} và ϕ_i^{ref} .

Từ (9) và (10), lấy đạo hàm của d_i và ϕ_i , ta có:

$$\begin{aligned} \dot{d}_i &= -v_i \cos \phi_i + v_{n_i} \cos(\beta_i - \phi_i) \\ \dot{\phi}_i &= \frac{v_i \sin \phi_i}{d_i} + \frac{v_{n_i} \sin(\beta_i - \phi_i)}{d_i} - \omega_i \end{aligned}$$

Khi đó, lần lượt giải các phương trình $\dot{d}_i = 0$ và $\dot{\phi}_i = 0$, ta được:

$$\begin{aligned} v_i &= v_{n_i} \frac{\cos(\beta_i - \phi_i)}{\cos \phi_i} \\ \omega_i &= v_{n_i} \frac{\sin \beta_i}{d_i \cos \phi_i} \end{aligned} \quad (11)$$

Với $\beta_i = \theta_{n_i} - \theta_i$ là sai lệch góc định hướng giữa mỗi cặp robot.

Như vậy, nếu tại thời điểm ban đầu các robot tạo thành đội hình (D, Φ) , luật điều khiển (11) đặt ra vận tốc và vận tốc góc cho robot follower tương ứng với vận tốc của robot leader và sai lệch góc định hướng β_i để các giá trị trong bộ số (D, Φ) luôn được giữ không đổi với giá trị tham chiếu (D^{ref}, Φ^{ref}) , nghĩa là đội hình được giữ không đổi theo thời gian.

4.3. Ứng dụng thuật toán đồng thuận trong điều khiển leader-follower.

Giả sử rằng các robot xuất phát từ các vị trí ban đầu tùy ý. Yêu cầu đặt ra là xây dựng một luật điều khiển cho các follower sao cho khoảng cách tương đối giữa các follower so với leader giữ đúng với giá trị tham chiếu, nghĩa là các giá trị trong bộ số (D, Φ) tiệm cận (D^{ref}, Φ^{ref}) . Xét sai lệch bám vị trí giữa robot follower so với robot leader:

$$\begin{aligned} p_{ix} &= x_{n_i} - x_i - d_{n_i, i}^x \\ p_{iy} &= y_{n_i} - y_i - d_{n_i, i}^y \end{aligned} \quad (12)$$

Trong đó $d_{n_i, i}^x$ và $d_{n_i, i}^y$ là các khoảng cách tham chiếu theo hai phương mà robot follower mong muốn giữ vững với robot leader và $\sqrt{(d_{n_i, i}^x)^2 + (d_{n_i, i}^y)^2} = d_{n_i, i}^{ref}$. Với một đội hình có cấu trúc được định nghĩa ban đầu, các khoảng cách này là các hằng số xác định.

Như vậy, có thể thấy rằng, điều khiển đội hình các robot có thể xem như vấn đề đồng thuận giữa các phần tử trong hệ đa đối tượng đã được xét đến trong mục trước. Khi đó, luật điều khiển (11) cho các follower được mở rộng:

$$\begin{aligned} v_i^* &= v_{n_i} \frac{\cos(\beta_i - \phi_i)}{\cos \phi_i} + K_1(x_{n_i} - x_i - d_{n_i, i}^x) \\ \omega_i^* &= v_{n_i} \frac{\sin \beta_i}{d_i \cos \phi_i} + K_2(y_{n_i} - y_i - d_{n_i, i}^y) \end{aligned} \quad (13)$$

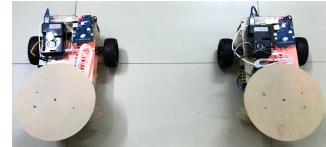
Trong đó K_1 và $K_2 > 0$ là những hệ số được chọn.

Với vị trí ban đầu của các robot là tùy ý, luật điều khiển (13) đặt ra vận tốc và vận tốc góc cho robot follower tương ứng với chuyển động của robot leader để các robot xác lập thành một đội hình và giữ đội hình không đổi với các khoảng cách và góc lệch mong muốn. Hay nói cách khác,

tồn tại một thời điểm ở vô cùng, các khoảng cách giữa mỗi cặp robot leader-follower tiệm cận giá trị tham chiếu $\|\mathbf{R}_{n_i} - \mathbf{R}_i\| \rightarrow d_{n_i, i}^{ref}$. Khi đó ta nói, hệ đạt được sự đồng thuận đội hình.

5. Mô hình thực nghiệm.

Để đánh giá tính khả thi của thuật toán, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình hai robot di động phục vụ cho các ứng dụng hợp tác vận chuyển vật và tìm kiếm.



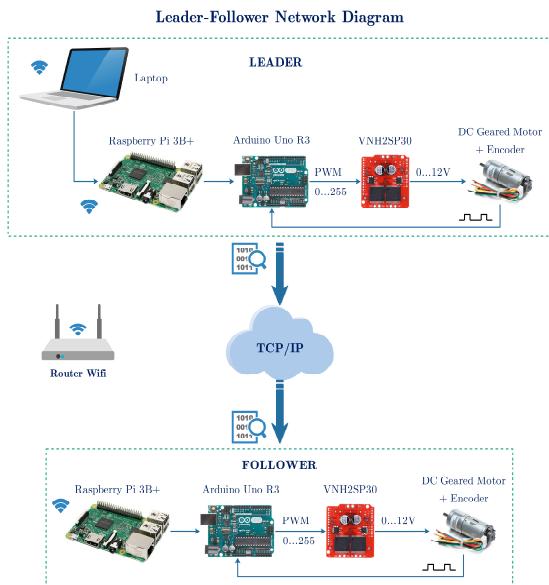
Hình 7. Mô hình robot thực nghiệm.

5.1. Mô tả vật lý.

Robot được điều khiển độc lập thông qua hai bánh xe và một bánh lái. Bánh xe có bán kính $r = 4,25\text{ cm}$ được gắn trên trục dẫn động có chiều dài $l = 25\text{ cm}$. Mỗi bánh xe được điều khiển bởi một động cơ điện một chiều DC Motor 12V, được trang bị hộp số có tỉ số truyền 1 : 34, tốc độ tối đa sau hộp số đạt $280\text{ rpm} \approx 29,32\text{ rad/s}$ và encoder quang có độ phân giải 374 xung. Đơn vị xử lý trung tâm của robot là máy tính nhúng Raspberry Pi 3B+ và board điều khiển Arduino Uno R3 thực hiện tính toán và các yêu cầu phức tạp khác như truyền thông, gửi nhận dữ liệu giữa các robot.

5.2. Phần mềm và lập trình.

Như đã giới thiệu, cấu trúc điều khiển ở mỗi robot chia thành hai lớp: lớp điều khiển cấp cao và lớp điều khiển cấp thấp. Lớp điều khiển cấp cao là Raspberry Pi 3B+ được lập trình trên ngôn ngữ Python và chạy với thời gian lấy mẫu $T_s = 5ms$. Raspberry Pi đặt ra các vận tốc mong muốn cho robot thông qua tốc độ tham chiếu của hai bánh xe (phép biến đổi 6.b) và gửi đến lớp điều khiển cấp thấp là Arduino qua giao tiếp truyền thông RS-232. Encoder đo tốc độ động cơ, phản hồi về Arduino. Từ sai lệch tốc độ, Arduino thực thi bộ điều khiển PID số với chu kỳ lấy mẫu $T_c = 10ms$, gửi tín hiệu điều khiển điện áp dưới dạng xung PWM đến driver VNH2SP30 (PWM tối đa 20kHz) điều khiển tốc độ động cơ để đảm bảo vận tốc của robot luôn giữ đúng với giá trị tham chiếu. Luật điều khiển yêu cầu follower phải biết chính xác vận tốc và vị trí của leader cũng như vị trí của chính nó. Điều này được thực hiện thông qua kết nối truyền thông Wifi giữa Raspberry Pi ở hai robot. Sơ đồ cấu trúc phản ứng và kết nối truyền thông giữa các robot trong mạng như sau:



Hình 8. Cấu trúc phân cứng và kết nối truyền thông giữa các robot.

6. Kết quả mô phỏng.

Trong mục này, một số mô phỏng được thực hiện khi phối hợp một nhóm ba robot di động trong hai nhiệm vụ hợp tác: vận chuyển vật và giám sát mục tiêu. Giả thiết rằng các robot là lý tưởng (chỉ xét đến mô hình động học), robot follower đáp ứng được vận tốc mà luật điều khiển đặt ra, các robot chuyển động không trượt, môi trường không có vật cản và không có nhiễu tác động lên các robot. Các mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink. Thông số của robot được sử dụng trong mô phỏng: $r = 0,1(m)$, $l = 0,5(m)$.

6.1. Case 1 – Phối hợp robot trong vận chuyển hợp tác.

Một trong những ứng dụng phổ biến của điều khiển đội hình là phối hợp một nhóm robot cùng vận chuyển một vật nặng. Tùy thuộc vào mục đích ứng dụng, kích thước và khối lượng của vật, đội hình sẽ thay đổi theo phù hợp. Ba robot xuất phát ở vị trí ban đầu mà tại đó chúng tạo thành một đội hình tam giác. Mục tiêu là nhóm robot di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối sao cho đội hình luôn được giữ không đổi để giữ vật không bị rơi trong quá trình vận chuyển.

Xét đội hình ba robot vận chuyển vật gồm một leader và hai follower. Vị trí ban đầu các robot:

$$+ \text{Leader (L)}: (x_L(0), y_L(0), \theta_L(0)) = (0, 0, 0).$$

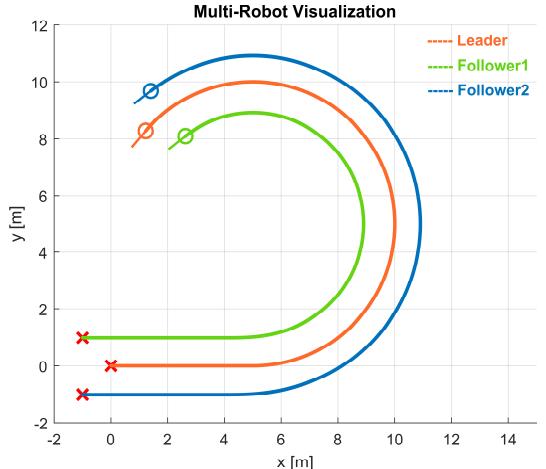
+ Follower1 (F1) và Follower2 (F2):

$$(x_{F1}(0), y_{F1}(0), \theta_{F1}(0)) = (-1, 1, 0).$$

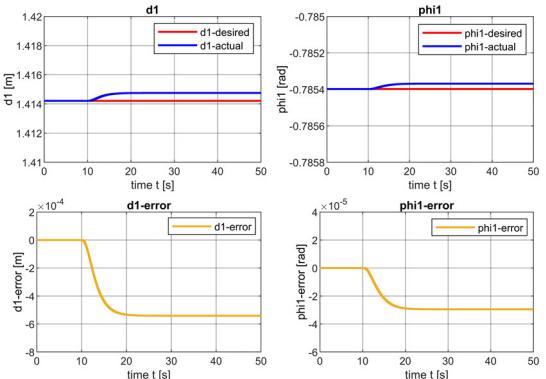
$$(x_{F2}(0), y_{F2}(0), \theta_{F2}(0)) = (-1, -1, 0).$$

Khi đó, tại thời điểm ban đầu các robot tạo thành đội hình $d_1^{ref} = d_2^{ref} = \sqrt{2}(m)$, $\phi_1^{ref} = -\frac{\pi}{4}$, $\phi_2^{ref} = \frac{\pi}{4}$. Robot leader di chuyển với vận tốc $v_L(t) = 1(m/s)$, vận tốc góc

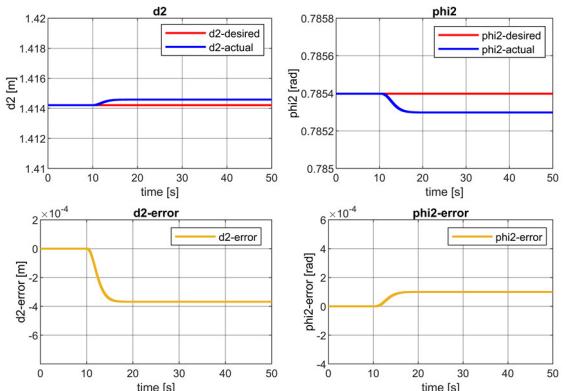
$\omega_L(t) = 0$ khi $0 < t \leq 5s$ và $\omega_L(t) = 0,2(rad/s)$ khi $5s < t \leq 25s$. Đặt các giới hạn tốc độ cho hai robot follower1 và follower2: $0 \leq v_{F1} \leq V_{F1} = 2(m/s)$, $|\omega_{F1}| \leq \Omega_{F1} = 0,8(rad/s)$; $0 \leq v_{F2} \leq V_{F2} = 2(m/s)$, $|\omega_{F2}| \leq \Omega_{F2} = 0,8(rad/s)$.



Hình 9. Quỹ đạo ba robot.



Hình 10. Vị trí follower1 so với leader.

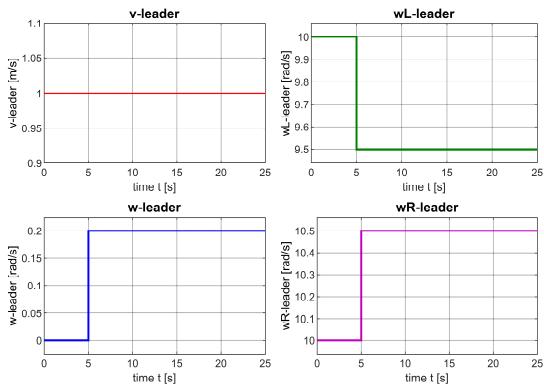


Hình 11. Vị trí follower2 so với leader.

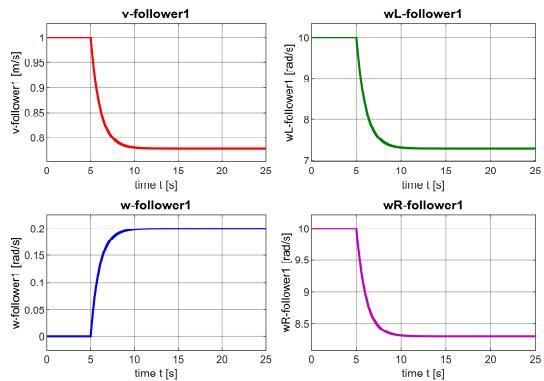
Quỹ đạo của các robot được thể hiện trong hình 9. Từ kết quả mô phỏng có thể thấy thuật toán cho đáp ứng tốt. Khi phối hợp ba robot cùng vận chuyển vật, đội hình gần như không đổi so với vị trí ban đầu. Các follower di chuyển giữ đúng vị trí tương đối so với leader khi sai lệch khoảng

cách giữa follower1 (hình 10) so với leader khoảng $6 \cdot 10^{-4} (m) \approx 0,6 (mm)$ và giữa follower2 (hình 11) so với leader là $4 \cdot 10^{-4} (m) \approx 0,4 (mm)$ là không đáng kể. Bên cạnh đó, sai lệch góc lệch giữa follower1 và follower2 so với leader lần lượt là $3 \cdot 10^{-5} (rad)$ và $10^{-4} (rad)$ là rất nhỏ. Như vậy vật không bị rời trong quá trình vận chuyển.

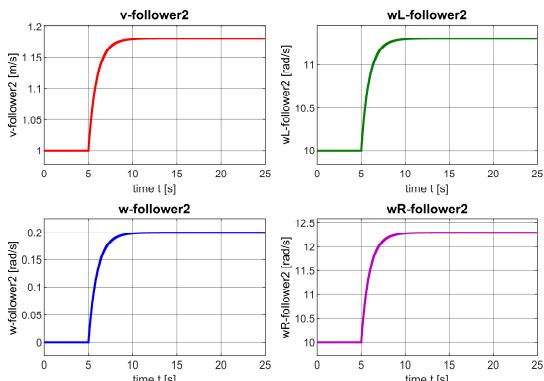
Ngoài ra, vận tốc và vận tốc góc của leader và follower cùng tốc độ tương ứng của các bánh xe được thể hiện trong các hình 12, hình 13 và hình 14.



Hình 12. Tốc độ robot leader.



Hình 13. Tốc độ robot follower1.



Hình 14. Tốc độ robot follower2.

6.2. Case 2 – Phối hợp robot trong nhiệm vụ tìm kiếm.

Một ứng dụng khác của điều khiển đội hình là phối hợp nhóm robot tham gia vào nhiệm vụ tìm kiếm. Xét đội hình ba robot. Tại thời điểm ban đầu, các robot ở những vị trí tùy ý, sau đó cùng di chuyển đến một vùng được chỉ định.

Các robot thiết lập thành một đội hình và giữ đội hình không đổi trong suốt nhiệm vụ.

Vị trí ban đầu các robot:

$$+ \text{Leader: } (x_L(0), y_L(0), \theta_L(0)) = (0, 0, 0).$$

+ Follower1 (F1) và Follower (F2):

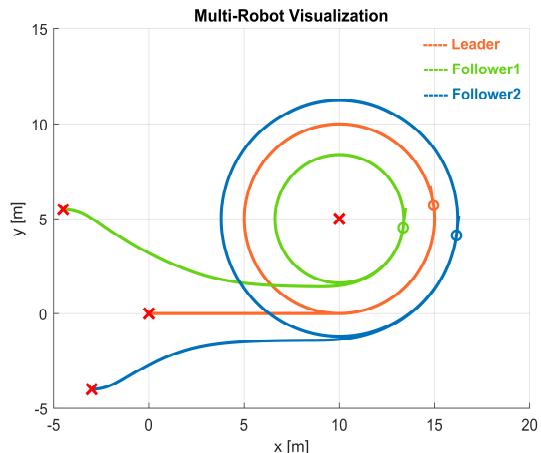
$$(x_{F1}(0), y_{F1}(0), \theta_{F1}(0)) = (-4.5, 5.5, 0).$$

$$(x_{F2}(0), y_{F2}(0), \theta_{F2}(0)) = (-3, -4, 0).$$

Khi đó, mục tiêu điều khiển là các robot follower di chuyển tạo thành đội hình tam giác với các khoảng cách và góc lệch tham chiếu so với leader lần lượt là:

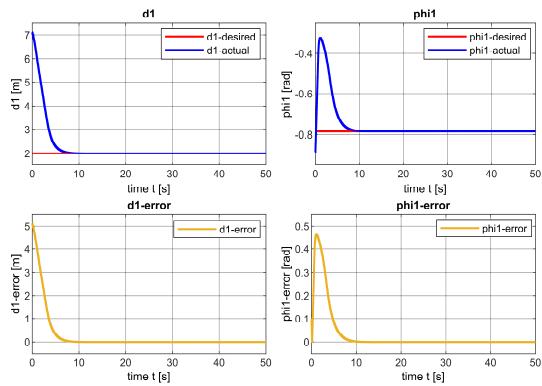
$$d_1^{ref} = d_2^{ref} = 2(m), \phi_1^{ref} = -\frac{\pi}{4}, \phi_2^{ref} = \frac{\pi}{4}. \text{ Robot leader}$$

di chuyển với vận tốc $v_L(t) = 1(m/s)$, vận tốc góc $\omega_L(t) = 0$ khi $0 < t \leq 10s$ và $\omega_L(t) = 0,2(rad/s)$ khi $10s < t \leq 50s$. Đặt các giới hạn tốc độ cho hai robot follower1 và follower2: $0 \leq v_{F1} \leq V_{F1} = 2(m/s)$, $|\omega_{F1}| \leq \Omega_{F1} = 0,8(rad/s)$; $0 \leq v_{F2} \leq V_{F2} = 2(m/s)$, $|\omega_{F2}| \leq \Omega_{F2} = 0,8(rad/s)$.

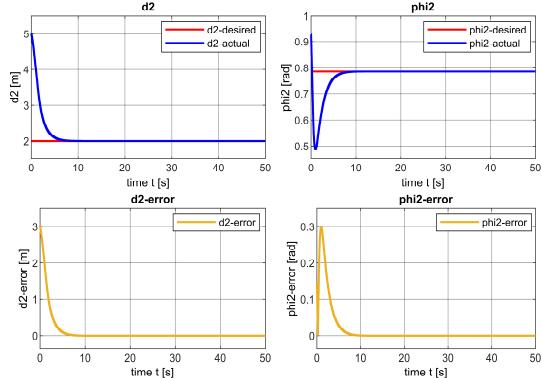


Hình 15. Quỹ đạo các robot.

Từ kết quả mô phỏng có thể thấy, xuất phát từ các vị trí ban đầu tùy ý, sau một khoảng thời gian, các follower di chuyển bám theo leader và tạo thành đội hình với các khoảng cách và góc lệch như mong muốn (hình 15) và giữ đội hình không đổi theo thời gian. Hình 16 và hình 17 thể hiện đáp ứng của hệ. Sau một khoảng thời gian ngắn $t_x \approx 10s$, khoảng cách và góc lệch giữa hai follower so với leader tiệm cận giá trị tham chiếu, các sai lệch tiến dần về 0. Hệ đạt được sự đồng thuận đội hình.

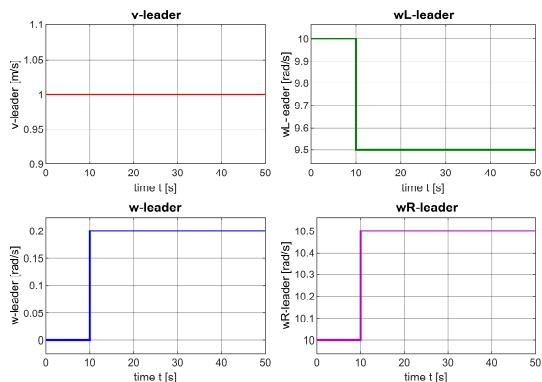


Hình 16. Vị trí follower1 so với leader.

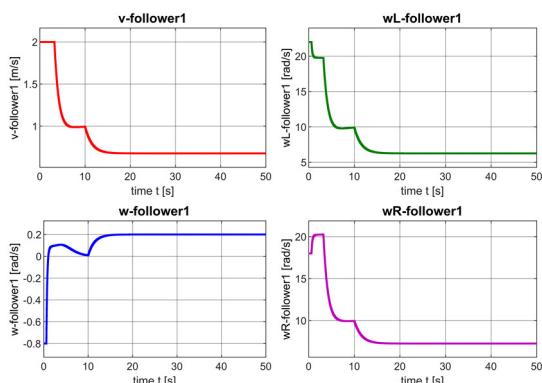


Hình 17. Vị trí follower2 so với leader.

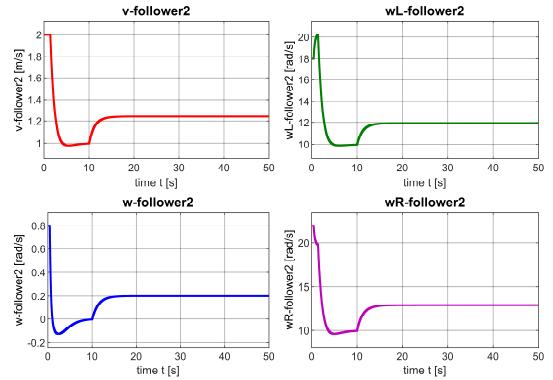
Ngoài ra, vận tốc và vận tốc góc của leader và follower cùng tốc độ tương ứng của các bánh xe được thể hiện trong các hình 18, hình 19 và hình 20.



Hình 18. Tốc độ robot leader.



Hình 19. Tốc độ robot follower1.



Hình 20. Tốc độ robot follower2.

7. Kết luận.

Trong bài báo này, chúng tôi đã nghiên cứu thuật toán điều khiển đội hình leader-follower ứng dụng cho hệ nhiều robot di động. Các mô phỏng được thực hiện trên công cụ Matlab/Simulink và luật điều khiển cho kết quả tốt. Để triển khai thuật toán, chúng tôi đề xuất mô hình hai robot di động phục vụ cho các ứng dụng hợp tác. Mỗi robot sử dụng Raspberry Pi 3B+ để tính toán và xử lý truyền thông, board điều khiển Arduino Uno R3 thực thi bộ điều khiển PID số điều khiển tốc độ động cơ. Hướng nghiên cứu trong tương lai của đề tài có thể mở rộng thêm những yêu cầu phức tạp hơn cho đội hình robot khi thực hiện nhiệm vụ như chủ động tránh va chạm, tránh vật cản, v.v.

Tài liệu tham khảo

- [1] Y. Cao, S. Fukunga, A. Kahng, "Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions," in *Autonomous Robots*, vol. 4, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 7-27.
- [2] D. Cruz, J. McClintock, B. Perteet, O. A. A. Orqueda, Y. Cao, R. Fierro, "Decentralized cooperative control - A multivehicle platform for research in networked embedded systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, no. 3, pp. 58-78, 2007.
- [3] W. Ren, "Consensus based formation control strategies for multi-vehicle systems," in *2006 American Control Conference*, Minneapolis, MN, USA, 2006.
- [4] W. Ren, H. Chao, W. Bourgeois, N. Sorensen and Y. Chen, "Experimental Validation of Consensus Algorithms for Multivehicle Cooperative Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 745-752, 2008.
- [5] W. Dong and J. A. Farrell, "Consensus of multiple nonholonomic systems," in *2008 47th IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, 2008.

- [6] K. D. Listmann, M. V. Masalawala and J. Adamy, "Consensus for formation control of nonholonomic mobile robots," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009.
- [7] Runsha Dong, Zhiyong Geng, "Consensus for formation control of multi-agent systems," *Int. J. Robust. Nonlinear Control*, vol. 25, no. 14, p. 2481–2501, 2014.
- [8] W. Ren, R. W. Beard and E. M. Atkins, "Information consensus in multivehicle cooperative control," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, no. 2, pp. 71-82, 2007.
- [9] J. Webster, "An Overview of Cooperative and Consensus Control of Multiagent Systems," in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [10] Y. Cao, W. Yu, W. Ren and G. Chen, "An Overview of Recent Progress in the Study of Distributed Multi-Agent Coordination," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 427-438, 2013.
- [11] T. Balch, R. C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, 1998.
- [12] J. R. T. Lawton, R. W. Beard, B. J. Young, "A decentralized approach to formation maneuvers," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 6, pp. 933-941, Dec 2003.
- [13] G. Antonelli, F. Arrichiello, S. Chiaverini, "Experiments of Formation Control With Multirobot Systems Using the Null-Space-Based Behavioral Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 1173-1182, 14 April 2009.
- [14] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, 2002.
- [15] Omar A.A. Orqueda, R. Fierro, "Robust Vision-based Nonlinear Formation Control," in *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- [16] J. P. Desai, J. P. Ostrowski, V. Kumar, "Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 6, pp. 905-908, 2001.
- [17] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "On the Control of a Leader-Follower Formation of Nonholonomic Mobile Robots," in *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*, San Diego, CA, USA, 2006.
- [18] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "A Geometric Characterization of Leader-Follower Formation Control," in *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007.
- [19] L. Consolini, F. Morbidi, D. Prattichizzo, M. Tosques, "Leader-Follower Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Input Constraints," *Automatica*, vol. 44, no. 5, pp. 1343-1349, May 2008.
- [20] Kar-Han Tan, M. A. Lewis, "Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, 1996.
- [21] Kar-Han Tan, M. A. Lewis, "High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures," *Autonomous Robots*, vol. 4, no. 4, pp. 387-403, 1997.
- [22] T. H. A. van den Broek, N. van de Wouw, H. Nijmeijer, "Formation control of unicycle mobile robots: a virtual structure approach," in *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, 2009.
- [23] A. Sadowska, T. H. A. van den Broek, H. Huijberts, N. van de Wouw, Kostic, H. Nijmeijer, "A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling," *International Journal of Control*, vol. 84, no. 11, p. 1886–1902, 2 November 2011.
- [24] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, 2004.
- [25] R. Olfati-Saber, J. A. Fax and R. M. Murray, "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," in *Proceedings of the IEEE*, 2007.
- [26] T. M. D. Tran, "Nghiên cứu về thuật toán đồng thuận cho hệ thống đa đối tượng," *Tạp chí KHCN Đại Học Đà Nẵng*, vol. 6(203), pp. 35-39, 2016.
- [27] T. M. D. Tran, "Optimization method in designing a finite-time average consensus protocol," *Tạp chí KHCN Đại Học Đà Nẵng*, vol. 12(133), pp. 1-5, 2018.
- [28] F. Morbidi, "Leader-Follower Formation Control and Visibility Maintenance of

Nonholonomic Mobile Robots," *Ph.D. Thesis*,
March 2009.

(*BBT nhận bài: .../.../201.., hoàn tất thủ tục phản biện: .../.../201..)*
(The Board of Editors received the paper on .../.../201..., its review was completed on .../.../201...)

Thông tin về tác giả

Hình tác giả 1	<p>Nguyễn Văn A:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu); - Tóm tắt công việc hiện tại (chức vụ, cơ quan); - Lĩnh vực quan tâm; - Điện thoại:
Hình tác giả 2	<p>Trần Văn B:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu); - Tóm tắt công việc hiện tại (chức vụ, cơ quan); - Lĩnh vực quan tâm; - Điện thoại.
Hình tác giả 3	<p>Lê Văn C:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu); - Tóm tắt công việc hiện tại (chức vụ, cơ quan); - Lĩnh vực quan tâm; - Điện thoại.
Hình tác giả 4	<p>Huỳnh Văn D:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tóm tắt quá trình đào tạo, nghiên cứu (thời điểm tốt nghiệp và chương trình đào tạo, nghiên cứu); - Tóm tắt công việc hiện tại (chức vụ, cơ quan); - Lĩnh vực quan tâm; - Điện thoại.