

## TÓM TẮT

Tên đề tài:

“Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Sinh viên thực hiện: Nguyễn Tân Thuyền.

Số thẻ SV: 105150348.

Lớp: 15TDHCLC.

Đề tài tập trung nghiên cứu điều khiển hợp tác trong các hệ thống đa đổi tượng, cốt lõi là thuật toán điều khiển đội hình leader-follower áp dụng cho hệ robot di động. Tùy theo mục đích và yêu cầu của ứng dụng, các robot follower duy trì khoảng cách và góc lệch tương đối với robot leader để giữ đội hình không đổi hoặc di chuyển tạo thành đội hình có dạng hình học mong muốn để một số nhiệm vụ có thể được hoàn thành nhờ sự cộng tác của các robot. Một số mô phỏng được thực hiện nhằm đánh giá tính hiệu quả của thuật toán trong các nhiệm vụ hợp tác: phối hợp đội hình robot trong nhiệm vụ giám sát mục tiêu và đội hình robot trong ứng dụng vận chuyển vật.

### Các vấn đề chính được nghiên cứu trong đề tài bao gồm:

- Tìm hiểu chung về điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đổi tượng.
- Cơ sở lý thuyết đồ thị, thuật toán đồng thuận và ứng dụng sự đồng thuận trong điều khiển đội hình leader-follower.
- Sơ đồ khối và cấu trúc điều khiển chi tiết mỗi robot.
- Mô hình động học của robot; động lực học cơ cấu chấp hành (động cơ); bộ điều khiển PID điều khiển tốc độ động cơ; phương thức truyền thông, chia sẻ dữ liệu giữa các robot.
- Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab-Simulink.
- Tích hợp phần cứng động lực, triển khai thuật toán và viết chương trình cho vi xử lý điều khiển các cơ cấu chấp hành.
- Thực hiện thí nghiệm điều khiển đội hình robot trong một số ứng dụng hợp tác.
- So sánh, đối chiếu với kết quả mô phỏng, hiệu chỉnh sai số để đạt được kết quả chính xác.

### Đề tài đã nghiên cứu và xây dựng được:

- Bước đầu nghiên cứu về điều khiển hợp tác trong các hệ thống đa đổi tượng.
- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết đồ thị, thuật toán đồng thuận và áp dụng thuật toán đồng thuận trong điều khiển đội hình leader-follower hệ robot di động.
- Xây dựng mô hình hai robot trong thí nghiệm thực tế. Thực nghiệm cho thấy thuật toán đã nghiên cứu cho đáp ứng tốt, tính khả thi cao, là cơ sở áp dụng đội hình robot di động trong các nhiệm vụ hợp tác.



## LỜI NÓI ĐẦU

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 yêu cầu 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.

Xuất phát từ thực tế trên, đề tài sẽ tập trung nghiên cứu về thuật toán điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đối tượng, áp dụng cho hệ robot di động trong hai nhiệm vụ hợp tác: phối hợp vận chuyển và giám sát mục tiêu.

Tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến TS. Trần Thị Minh Dung đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ và động viên tôi trong suốt quá trình thực hiện đồ án. Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến các thầy cô trong Khoa Điện, bộ môn Tự Động Hóa, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng đã tận tình chỉ dạy, truyền đạt kiến thức cho tôi trong suốt quá trình học tập tại trường. Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến Ths. Lưu Đức Hòa cùng Công ty TNHH Hòa Phát An đã tạo điều kiện thuận lợi, cung cấp những tài liệu cần thiết phục vụ cho việc nghiên cứu trong thời gian tôi thực hiện đề tài tốt nghiệp này.

Mặc dù đã cố gắng hoàn thành khóa luận tốt nghiệp, do thời gian và kiến thức còn hạn chế nên đề tài này không tránh khỏi những thiếu sót. Mong nhận được ý kiến đóng góp của thầy cô và các bạn để đề tài được hoàn thiện hơn.

Một lần nữa xin chân thành cảm ơn!

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan đây là phần nghiên cứu và thể hiện trong đồ án tốt nghiệp của tôi, không sao chép từ các đồ án khác. Các số liệu phân tích được sử dụng trong đồ án có nguồn gốc rõ ràng theo đúng quy định. Các kết quả nghiên cứu do tôi tự tìm hiểu, phân tích một cách trung thực, khách quan và phù hợp với thực tiễn của Việt Nam. Nếu sai tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm và chịu mọi kỷ luật của Khoa và Trường đề ra.

Sinh viên thực hiện,

Nguyễn Tân Thuyền

## MỤC LỤC

Tóm tắt

Nhiệm vụ đồ án

Lời nói đầu và cảm ơn ..... i

Lời cam đoan liêm chính học thuật ..... ii

Mục lục ..... iii

Danh mục các bảng biểu, hình vẽ và sơ đồ ..... v

Danh sách các cụm từ viết tắt ..... viii

Trang

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ ROBOT VÀ ĐIỀU KHIỂN TƯƠNG TÁC TRONG CÁC HỆ THỐNG ĐA ĐỐI TƯỢNG. ..... 1

    1.1. Sự phát triển của robot ..... 1

    1.2. Điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đối tượng ..... 2

        1.2.1. Thực tiễn và tiềm năng ..... 2

        1.2.2. Định hướng nghiên cứu ..... 6

    1.3. Đóng góp của đề tài ..... 13

    1.4. Bố cục của đề tài ..... 13

CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỆ THỐNG ..... 15

    2.1. Mô hình động học robot di động ..... 15

    2.2. Mô hình động lực học của robot ..... 17

        2.2.1. Mô hình toán học động cơ điện một chiều ..... 18

        2.2.2. Mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ ..... 19

    2.3. Lý thuyết đồ thị và thuật toán đồng thuận ..... 21

        2.3.1. Lý thuyết đồ thị – Graph Theory ..... 21

        2.3.2. Thuật toán đồng thuận – Consensus ..... 23

    2.4. Thuật toán điều khiển đội hình leader-follower ..... 24

        2.4.1. Giản đồ điều khiển đội hình – Control Graph ..... 25

        2.4.2. Luật điều khiển leader-follower cho đội hình hai robot ..... 26

        2.4.3. Luật điều khiển leader-follower cho đội hình nhiều robot ..... 31

2.5. Điều khiển leader-follower ứng dụng thuật toán đồng thuận. ....	33
2.6. Sơ đồ khái niệm điều khiển chi tiết cho hệ robot. ....	34
2.7. Kết luận. ....	34
<b>CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG. ....</b>	<b>36</b>
3.1. Mô phỏng 1 – Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot. ....	37
3.2. Mô phỏng 2 – Vận chuyển hợp tác đội hình ba robot. ....	44
3.3. Mô phỏng 3 – Đội hình robot giám sát mục tiêu. ....	50
<b>CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM. ....</b>	<b>56</b>
4.1. Kết cấu vật lý của robot. ....	56
4.1.1. Máy tính nhúng Raspberry Pi 3 Model B+. ....	57
4.1.2. Arduino Uno R3. ....	58
4.1.3. Động cơ DC Servo.....	59
4.1.4. Motor Shield VNH2SP30.....	60
4.2. Phần mềm và lập trình. ....	60
4.3. Kết nối truyền thông. ....	61
4.3.1. Truyền thông Raspberry Pi – Arduino. ....	61
4.3.2. Truyền thông Raspberry Pi – Raspberry Pi. ....	62
4.4. Thực nghiệm. ....	63
4.4.1. Thực nghiệm 1 – Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot. ....	63
4.4.2. Thực nghiệm 2 – Xác lập đội hình hai robot. ....	65
<b>KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN. ....</b>	<b>68</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>71</b>

## DANH MỤC CÁC BẢNG, HÌNH ẢNH

### ***Danh mục các bảng:***

Bảng 3. 1. Thông số của Robot. ....	36
-------------------------------------	----

### ***Danh mục hình ảnh:***

Hình 1. 1. Robot Asimo (Honda) và Robot Pepper (Softbank). ....	1
Hình 1. 2. Mars Exploration Rover và Robot Pioneer P3-DX. ....	2
Hình 1. 3. Phối hợp hai hay nhiều robot cùng vận chuyển vật.....	3
Hình 1. 4. Phối hợp nhiều thiết bị bay cùng vận chuyển hàng hóa.....	4
Hình 1. 5. Sử dụng robot trong kiểm soát cháy rừng. ....	4
Hình 1. 6. Phối hợp UAVs trong các nhiệm vụ trinh sát.....	5
Hình 1. 7. Phối hợp UGVs trong tìm kiếm mục tiêu.....	5
Hình 1. 8. Phối hợp AUVs trong tác chiến dưới nước. ....	5
Hình 1. 9. Phối hợp robot trong trình diễn nghệ thuật. ....	5
Hình 1. 10. Điều khiển tập trung đội hình robot [14].....	7
Hình 1. 11. Điều khiển phân tán đội hình robot. ....	7
Hình 1. 12. Điều khiển đội hình behavior based [22] . .....	8
Hình 1. 13. Điều khiển đội hình Null-Space-based Behavior [25] .....	9
Hình 1. 14. Điều khiển đội hình leader-follower [26].....	9
Hình 1. 15. Điều khiển leader-follower theo $l - \psi$ [22]. ....	10
Hình 1. 16. Điều khiển leader-follower theo $l - l$ [22].....	10
Hình 1. 17. Điều khiển đội hình leader-follower sử dụng camera [37]. .....	12
Hình 1. 18. Điều khiển đội hình virtual-structure. ....	12
Hình 1. 19. Điều khiển virtual structure kết hợp bám quỹ đạo [43, 47]. .....	13
Hình 1. 20. Bố cục sơ lược đề tài. ....	14
Hình 2. 1. Mô hình robot trong hệ tọa độ $xOy$ .....	17
Hình 2. 2. Mạch điện tương đương động cơ một chiều [58]. ....	18
Hình 2. 3. Sơ đồ khối động cơ điện một chiều [58]. .....	19
Hình 2. 4. Sơ đồ điều khiển vòng kín sử dụng PID [59]. .....	20
Hình 2. 5. Mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ. ....	21
Hình 2. 6. Dòng chảy thông tin từ nút $j$ đến nút $i$ .....	22
Hình 2. 7. Đồ thị có hướng (a) và đồ thị vô hướng (b). ....	22
Hình 2. 8. Đồ thị cây mở rộng (directed spanning tree).....	23

Hình 2. 9. ĐỒNG THUẬN THÔNG TIN TRONG HỆ ĐA ĐÓI TƯỢNG.	24
Hình 2. 10. GIẢN ĐỒ ĐIỀU KHIỂN ĐỘI HÌNH (control graph) [26].	25
Hình 2. 11. DÒNG CHẢY THÔNG TIN TRONG ĐỘI HÌNH LEADER-FOLLOWER.	26
Hình 2. 12. ĐIỀU KHIỂN ĐỘI HÌNH LEADER-FOLLOWER HAI ROBOT.	27
Hình 2. 13. ĐIỀU KHIỂN ĐỘI HÌNH LEADER-FOLLOWER NHIỀU ROBOT.	32
Hình 2. 14. CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN HỆ ĐA ROBOT DI ĐỘNG.	34
Hình 3. 1. MÔ PHỎNG VẬN CHUYỂN HỢP TÁC ĐỘI HÌNH HAI ROBOT.	38
Hình 3. 2. MÔ HÌNH ROBOT LEADER.	39
Hình 3. 3. MÔ HÌNH ROBOT FOLLOWER.	39
Hình 3. 4. KHỐI ĐỘNG CƠ DC MOTOR VÀ SPEED CONTROLLER.	40
Hình 3. 5. BỘ ĐIỀU KHIỂN LEADER-FOLLOWER CONTROLLER.	41
Hình 3. 6. KHỐI TÍNH TÍNH KHOẢNG CÁCH $d$ VÀ GÓC LỆCH $\phi$ .	41
Hình 3. 7. QUÝ ĐẠO HAI ROBOT.	42
Hình 3. 8. KHOẢNG CÁCH VÀ GÓC LỆCH GIỮA FOLLOWER SO VỚI LEADER.	42
Hình 3. 9. TỐC ĐỘ ROBOT LEADER VÀ HAI BÁNH XE.	43
Hình 3. 10. TỐC ĐỘ ROBOT FOLLOWER VÀ HAI BÁNH XE.	44
Hình 3. 11. MÔ PHỎNG VẬN CHUYỂN HỢP TÁC ĐỘI HÌNH BA ROBOT.	46
Hình 3. 12. KHỐI TÍNH KHOẢNG CÁCH $d_1, d_2$ VÀ GÓC LỆCH $\phi_1, \phi_2$ .	47
Hình 3. 13. QUÝ ĐẠO BA ROBOT.	47
Hình 3. 14. KHOẢNG CÁCH VÀ GÓC LỆCH GIỮA FOLLOWER1 SO VỚI LEADER.	48
Hình 3. 15. KHOẢNG CÁCH VÀ GÓC LỆCH GIỮA FOLLOWER2 SO VỚI LEADER.	48
Hình 3. 16. TỐC ĐỘ ROBOT LEADER VÀ HAI BÁNH XE.	49
Hình 3. 17. TỐC ĐỘ ROBOT FOLLOWER1 VÀ HAI BÁNH XE.	49
Hình 3. 18. TỐC ĐỘ ROBOT FOLLOWER2 VÀ HAI BÁNH XE.	50
Hình 3. 19. QUÝ ĐẠO BA ROBOT.	52
Hình 3. 20. KHOẢNG CÁCH VÀ GÓC LỆCH GIỮA FOLLOWER1 SO VỚI LEADER.	52
Hình 3. 21. KHOẢNG CÁCH VÀ GÓC LỆCH GIỮA FOLLOWER2 SO VỚI LEADER.	53
Hình 3. 22. TỐC ĐỘ ROBOT LEADER VÀ HAI BÁNH XE.	54
Hình 3. 23. TỐC ĐỘ ROBOT FOLLOWER1 VÀ HAI BÁNH XE.	54
Hình 3. 24. TỐC ĐỘ ROBOT FOLLOWER2 VÀ HAI BÁNH XE.	55
Hình 4. 1. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM HAI ROBOT DI ĐỘNG.	57
Hình 4. 2. MÁY TÍNH NHÚNG RASPBERRY PI 3 MODEL B+.	57
Hình 4. 3. BOARD ARDUINO UNO R3.	58

Hình 4. 4. Động cơ DC Geared Motor GA25 V1. ....	59
Hình 4. 5. Motor Shield VNH2SP30.....	60
Hình 4. 6. Kết nối mạng giữa các robot. ....	61
Hình 4. 7. Truyền thông Raspberry Pi – Arduino. ....	62
Hình 4. 8. Mô hình Client – Server. ....	63
Hình 4. 9. Thực nghiệm hai robot vận chuyển vật (di chuyển nối tiếp).....	64
Hình 4. 10. Thực nghiệm hai robot vận chuyển vật (di chuyển song song).....	65
Hình 4. 11. Thí nghiệm xác lập đội hình hai robot. ....	66

## DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

### KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT:

$\mathbb{N}$	tập hợp các số tự nhiên
$\mathbb{R}$	tập hợp các số thực
$\mathbb{R}^+$	tập hợp các số thực không âm: $\mathbb{R}^+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x \geq 0\}$
$\operatorname{sgn}(x)$	hàm định dấu của $x$ : $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$
$\langle x, y \rangle$	tích vô hướng của hai vector $x$ và $y$ :
	$\forall x, y \in \mathbb{R}^n (n \geq 1), x = [x_1, \dots, x_n]^T, y = [y_1, \dots, y_n]^T, \langle x, y \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$
$\ x\ _2$	khoảng cách Euclid (norm) của vector $x$ : $\ x\ _2 = \sqrt{\langle x, x \rangle}$

AI	Artificial Intelligence
WMR	Wheeled Mobile Robot
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
UGVs	Unmanned Ground Vehicles
AUVs	Autonomous Underwater Vehicles
AVSs	Autonomous Vehicles Systems
MAS	Multi-agent Systems
MRS	Multi-robot Systems
Cooperative Control	Điều khiển hợp tác
Cooperative Transport	Vận chuyển hợp tác
Formation Control	Điều khiển đội hình
Decentralized Control	Điều khiển phân tán
Centralized Control	Điều khiển tập trung

## CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ ROBOT VÀ ĐIỀU KHIỂN TƯƠNG TÁC TRONG CÁC HỆ THỐNG ĐA ĐỐI TƯỢNG.

### Nội dung chính:

---

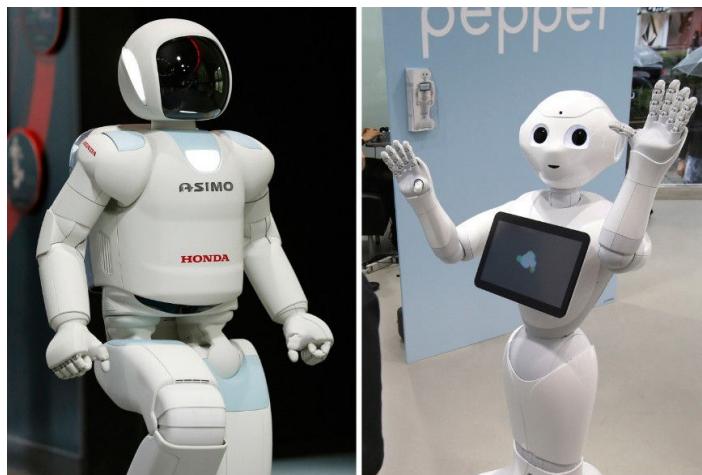
1.1. Sự phát triển của robot .....	1
1.2. Điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đối tượng .....	2
1.2.1. Thực tiễn và tiềm năng .....	2
1.2.2. Định hướng nghiên cứu .....	6
1.3. Đóng góp của đề tài .....	13
1.4. Bố cục của đề tài .....	13

---

### 1.1. Sự phát triển của robot.

Nghiên cứu về robot bắt đầu từ những năm 1960, khi Nils Nilsson và nhóm nghiên cứu của mình đã phát triển một mô hình robot di động có tên là “Shakey the Robot” phục vụ công việc nghiên cứu trí thông minh nhân tạo (Artificial Intelligence), điều khiển robot chuyển động trong các môi trường vật lý phức tạp.

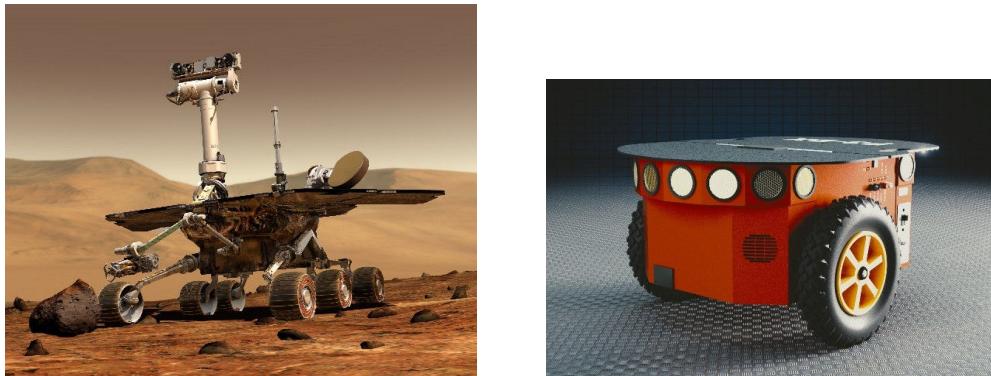
Vào những năm 1980, nhiều công ty công nghệ nổi tiếng thế giới như General Electric, Honda và Sony cũng đã bắt đầu phát triển các nền tảng robot riêng cho mình. Tuy nhiên, các robot này chủ yếu được sử dụng trong các phòng thí nghiệm ở trường đại học và viện nghiên cứu.



Hình 1. 1. Robot Asimo (Honda) và Robot Pepper (Softbank).

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đối tượng”.

Đến những năm 1990, nhờ sự phát triển của kỹ thuật cảm biến và trí tuệ nhân tạo, công nghệ robot đã phát triển nhanh chóng và robot di động đã được áp dụng rộng rãi hơn. Ví dụ, nền tảng robot SR4 trên Linux được phát triển bởi công ty Smart Robots, robot di động có bánh xe (wheeled mobile robot) Pioneer P3-DX được phát triển bởi ActivMedia Robotics được sử dụng trong nghiên cứu và giảng dạy, hay Mars Exploration Rover Spirit (MER) – xe tự hành trên sao hỏa của NASA,...



*Hình 1. 2. Mars Exploration Rover và Robot Pioneer P3-DX.*

## **1.2. Điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đối tượng.**

### **1.2.1. Thực tiễn và tiềm năng.**

Điều khiển hợp tác (cooperative control) trong hệ thống đa đối tượng (multi-agent systems) có thể được mô tả như một tập hợp các phần tử có khả năng đưa ra quyết định nhưng khả năng xử lý và truyền thông giữa các phần tử bị giới hạn, để cùng đạt được mục tiêu chung. Trong kỹ thuật, những hệ thống đa đối tượng thường gặp có thể kể đến như hệ robot di động (mobile robot systems), hệ thống xe tự hành (autonomous vehicles systems), mạng lưới cảm biến (sensors networks),... Những lĩnh vực nghiên cứu liên quan đến điều khiển hợp tác bao gồm: điều khiển hệ đa đối tượng (multi-agent systems), hệ thống phân tán (distributed systems), lý thuyết nhóm (team theory) hay robot học bầy đàn (robotic swarms) [1].

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. Những tiến bộ gần đây trong truyền thông, máy tính và công nghệ nhúng đã hỗ trợ rất nhiều cho sự phát triển điều khiển hợp tác. Về sự hợp tác, theo tài liệu [2] các tác giả đưa ra định nghĩa: “*Các nhiệm vụ được chỉ định bởi người thiết kế, một hệ thống đa đối tượng thể*

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

hiện được ‘tiềm năng hợp tác’ nếu, từ các đặc điểm cấu tạo bên trong của hệ (cấu trúc điều khiển, kết nối truyền thông,...) có sự tăng lên rõ rệt tổng lợi ích nhận được từ hệ”. 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 (multipoint surveillance), lập bản đồ (mapping), vận chuyển hợp tác (cooperative transportation) hay trình diễn nghệ thuật [3]. Ngoài ra, sự hợp tác sẽ tạo ra một hệ thống dự phòng khi sự hỏng hóc của một robot có thể được bù đắp bởi các robot khác. Bên cạnh đó, việc phối hợp một nhóm các thiết bị, phương tiện công nghệ cao cũng đang dần được áp dụng trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là quân sự.

- Phối hợp nhiều robot trong những tác vụ khó thực hiện được bởi một robot như cùng vận chuyển hay sắp xếp một vật có kích thước và khối lượng lớn.



Hình 1. 3. Phối hợp hai hay nhiều robot cùng vận chuyển vật.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- Tính linh động: Mỗi robot trong nhóm có thể đảm nhận nhiều vai trò nên có thể được sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau, có thể giảm hoặc tăng số lượng robot tùy thuộc vào yêu cầu thời gian.



*Hình 1. 4. Phối hợp nhiều thiết bị bay cùng vận chuyển hàng hóa.*

- Thực hiện các nhiệm vụ nguy hiểm: Phối hợp nhiều robot cùng hoạt động trong các khu vực có tính chất nguy hiểm mà con người không thể thực hiện như tìm kiếm nạn nhân trong các tòa nhà sụp đổ, dọn dẹp khu vực ô nhiễm độc hại (vùng phóng xạ), kiểm soát cháy rừng...



*Hình 1. 5. Sử dụng robot trong kiểm soát cháy rừng.*

- Ứng dụng trong kỹ thuật quân sự: Phối hợp những thiết bị công nghệ cao như xe tự hành UGVs (Unmanned Ground Vehicles), thiết bị bay không người lái UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), hay thiết bị tự động dưới nước AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) trong các nhiệm vụ quân sự như trinh sát, tìm kiếm mục tiêu hay tác chiến dưới nước.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 1. 6. Phối hợp UAVs trong các nhiệm vụ trinh sát.

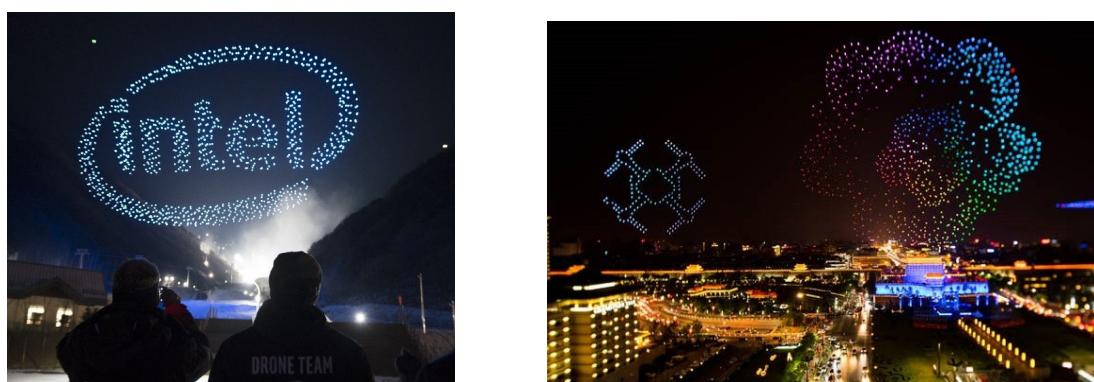


Hình 1. 7. Phối hợp UGVs trong tìm kiếm mục tiêu.



Hình 1. 8. Phối hợp AUVs trong tác chiến dưới nước.

- Trình diễn nghệ thuật: Phối hợp một nhóm các thiết bị bay như drone trong các buổi hòa nhạc, trình diễn ánh sáng,...



Hình 1. 9. Phối hợp robot trong trình diễn nghệ thuật.

### 1.2.2. Định hướng nghiên cứu.

Điều khiển hợp tác trong các hệ thống đa đối tượng đặt ra nhiều thách thức không những nghiên cứu về lý thuyết mà còn thực tiễn. Những thách thức này bao gồm việc phát triển các thuật toán điều khiển, định vị robot trong các môi trường vật lý, cũng như các phương thức truyền thông giữa các robot. 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 vấn đề quan trọng, và là cơ sở chính được nghiên cứu trong điều khiển hợp tác. Mục tiêu chính của điều khiển hợp tác là xây dựng một chiến lược điều khiển cho phép mỗi phần tử trong hệ 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. Tùy theo mục đích ứng dụng và tính chất của đối tượng trong hệ, những thông tin này có thể là vận tốc, khoảng cách, góc lệch, v.v. Một trong những nghiên cứu điều khiển hợp tác dựa trên sự đồng thuận là bài toán điều khiển đội hình. Điều khiển đội hình có thể hiểu đơn giản là điều khiển đồng thời vị trí và góc định hướng của các robot trong nhóm cùng di chuyển, đảm bảo đội hình luôn được giữ không đổi để một số nhiệm vụ có thể được hoàn thành nhờ sự cộng tác của các robot [4]. Nhiều ứng dụng hợp tác như phối hợp robot vận chuyển vật [5], [6], [7], [8] [9], giám sát mục tiêu trong trinh sát [10], [11], v.v. được các tác giả nghiên cứu dựa trên cơ sở điều khiển đội hình. Một cách tổng quát, tùy thuộc vào “tính tham chiếu” của nhóm mà điều khiển đội hình được chia thành hai hướng: điều khiển hình thành đội hình “formation producing” và điều khiển bám đội hình “formation tracking”. Ở đây, tính tham chiếu được hiểu là “robot tham chiếu” thường được gọi là “leader” hay “leader ảo”. Trong điều khiển formation producing, mục tiêu điều khiển là các robot tập hợp thành một đội hình mà không tồn tại robot tham chiếu. Ngược lại, điều khiển đội hình với một robot tham chiếu được gọi là formation tracking, các phần tử trong nhóm tạo thành đội hình và di chuyển bám theo robot tham chiếu [12].

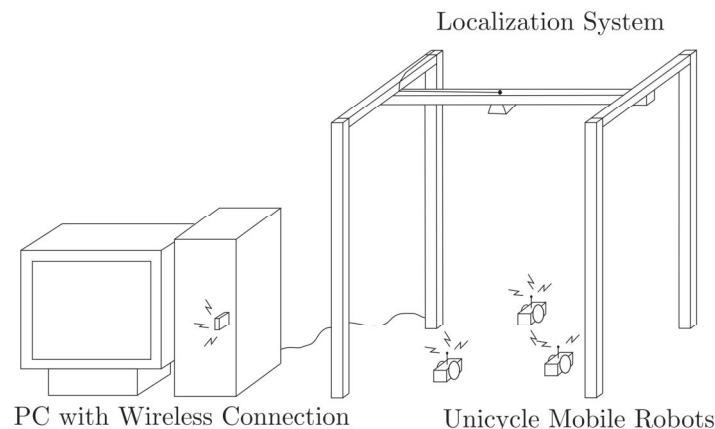
Trong điều khiển đội hình cũng như điều khiển hợp tác hệ đa đối tượng, hai khía cạnh cần được xem xét là: cấu trúc điều khiển (control structure) và phương pháp điều khiển (control approach).

#### a. Cấu trúc điều khiển.

Mục tiêu chính của điều khiển đội hình là hệ cùng đạt được mục tiêu chung về khoảng cách và góc lệch mà ở đó thông tin về vị trí của các phần tử phải được biết chính xác. Điều này đặt ra vấn đề lựa chọn cấu trúc điều khiển và phương thức truyền thông phù hợp giữa các phần tử. Hai cấu trúc điều khiển được áp dụng trong điều khiển đội hình là cấu trúc điều khiển tập trung (centralized control) và cấu trúc điều khiển phân tán (decentralized control).

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Trong cấu trúc điều khiển tập trung, một trung tâm xử lý là máy tính (máy chủ) thu thập và xử lý tất cả thông tin cần thiết và đặt ra yêu cầu chuyển động cho các robot. Theo tài liệu [13], nhóm nghiên cứu của R. Carelli đã thực hiện thí nghiệm điều khiển đội hình robot dựa trên cấu trúc điều khiển tập trung, các robot được giám sát bằng camera và dữ liệu được truyền về máy tính. Cấu trúc này dễ dàng thực hiện với một nhóm các robot kích thước nhỏ, tuy nhiên khi mở rộng số lượng robot lớn hơn, yêu cầu phải giám sát và điều khiển trong phạm vi rộng, máy tính phải có khả năng tính toán và tốc độ xử lý nhanh hơn. Ngoài ra, khi máy chủ xảy ra sự cố hay hỏng hóc, nhiệm vụ sẽ không được hoàn thành nên dẫn đến những hạn chế nhất định của mô hình.



*Hình 1. 10. Điều khiển tập trung đội hình robot [14].*

Với cấu trúc điều khiển phân tán, mỗi robot được điều khiển độc lập thông qua dữ liệu trạng thái được gửi đến từ các robot lân cận. Ưu điểm của cấu trúc này là chi phí thấp, không yêu cầu các thiết bị định vị hay giám sát như camera nên khả thi hơn khi mở rộng số lượng robot trong đội hình so với cấu trúc điều khiển tập trung. Tuy nhiên, nhược điểm của cấu trúc điều khiển này là tính thụ động, phụ thuộc vào độ chính xác kết quả đo từ các thiết bị được gắn trên mỗi robot. Một số kết quả nghiên cứu có thể kể đến như [15, 16, 17, 18].



*Hình 1. 11. Điều khiển phân tán đội hình robot.*

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

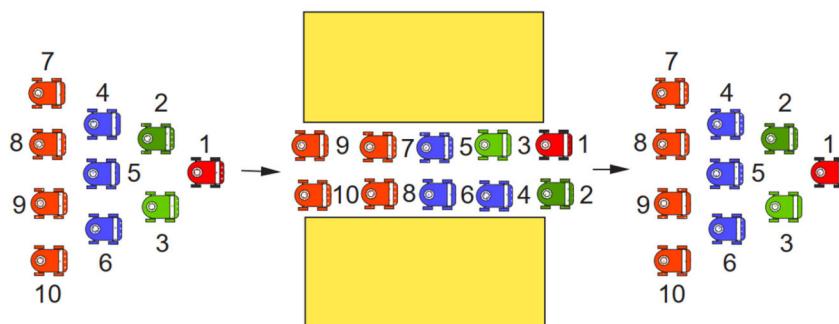
Mặc dù cả hai cấu trúc điều khiển trên đều có thể được áp dụng tùy thuộc vào mục đích ứng dụng cũng như điều khiển thí nghiệm thực tế. Tuy nhiên, do những hạn chế về vật lý là không thể tránh khỏi như nguồn tài nguyên, năng lượng, giới hạn truyền thông,... cấu trúc điều khiển phân tán được cho là hứa hẹn và được áp dụng phổ biến hơn trong nghiên cứu điều khiển hợp tác hệ robot di động.

### b. Phương pháp điều khiển.

Đã có nhiều phương pháp điều khiển đội hình robot được nghiên cứu và phát triển. Mỗi phương pháp đều có những ưu và nhược điểm riêng, tuy nhiên có thể được phân loại thành ba nhóm chính: điều khiển behavior-based, điều khiển leader-follower, điều khiển virtual-structure.

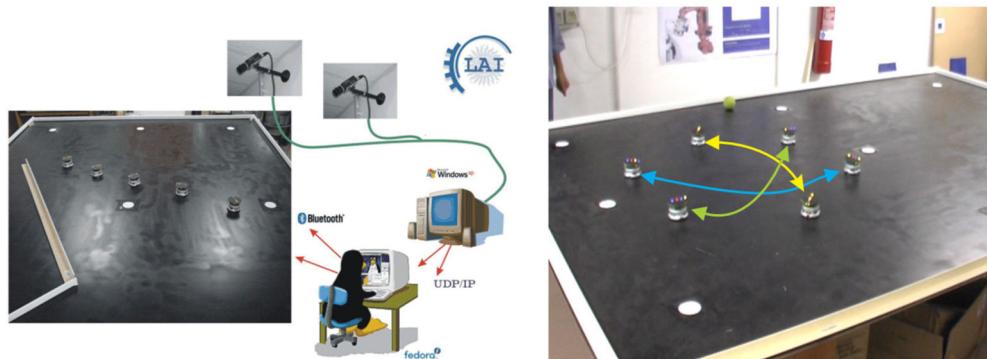
#### ✚ Điều khiển behavior-based.

Trong phương pháp điều khiển behavior-based, một số hành vi mong muốn như tránh vật cản, tránh va chạm,... được chỉ định cho mỗi robot và hành động cuối cùng của nhóm được quyết định bởi “tầm quan trọng tương đối” của từng hành vi. Trong bộ điều khiển behavior-based, mỗi hành vi riêng lẻ được xem như là một bộ điều khiển con (sub-controller) để cùng đạt mục tiêu chung. Ví dụ như, nếu ta xem “tạo thành một dạng hình học mong muốn” là một hành vi, “tránh vật cản” là một hành vi khác, khi một robot hoạt động với hai chế độ thì mục tiêu chung sẽ là “tạo thành đội hình có dạng hình học mong muốn, đồng thời tránh vật cản”. Nhiều thuật toán behavior-based đã được nghiên cứu và giới thiệu trong các tài liệu [17, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Theo [21, 22], nhóm nghiên cứu của J. P. Desai đã đề xuất luật điều khiển cho phép các robot thay đổi đội hình tương thích với điều kiện môi trường khi gặp vật cản, sau đó chuyển đổi về đội hình ban đầu. Bên cạnh đó, G. Antonelli cũng đã thực hiện thí nghiệm điều khiển đội hình NSB (Null-Space based behavior) cho một nhóm robot [25] khi có thể thay đổi theo đội hình mong muốn.



Hình 1. 12. Điều khiển đội hình behavior based [22].

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

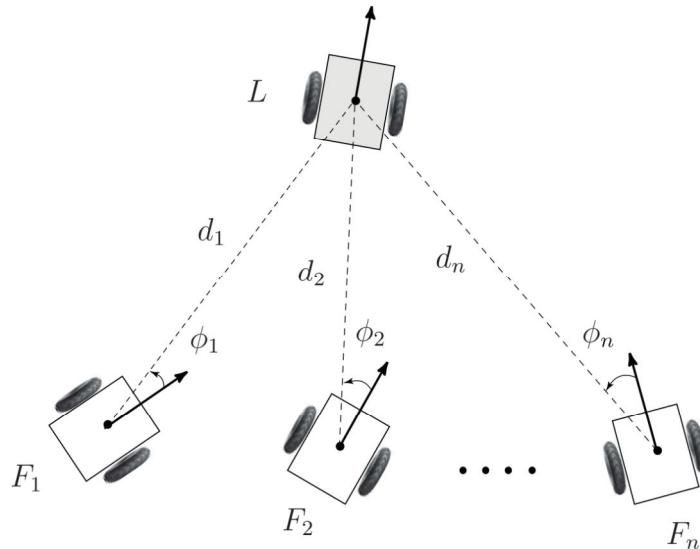


Hình 1. 13. Điều khiển đội hình Null-Space-based Behavior [25]

Ưu điểm của phương pháp điều khiển behavior-based là ít thông tin cần phải chia sẻ và giao tiếp giữa các robot, do đó thường được sử dụng để điều khiển đội hình robot hoạt động trong môi trường thay đổi liên tục hoặc không xác định. Tuy nhiên, nhược điểm là khó có thể mô tả chính xác mô hình động lực học và đảm bảo sự ổn định của toàn hệ thống.

#### ✚ Điều khiển leader-follower.

Trong phương pháp điều khiển leader-follower, một hay một số robot sẽ được chỉ định là “robot dẫn đầu” (leader), di chuyển theo một quỹ đạo được định trước. Các robot còn lại (followers) di chuyển duy trì khoảng cách và góc lệch tương đối với leader để giữ đội hình không đổi.

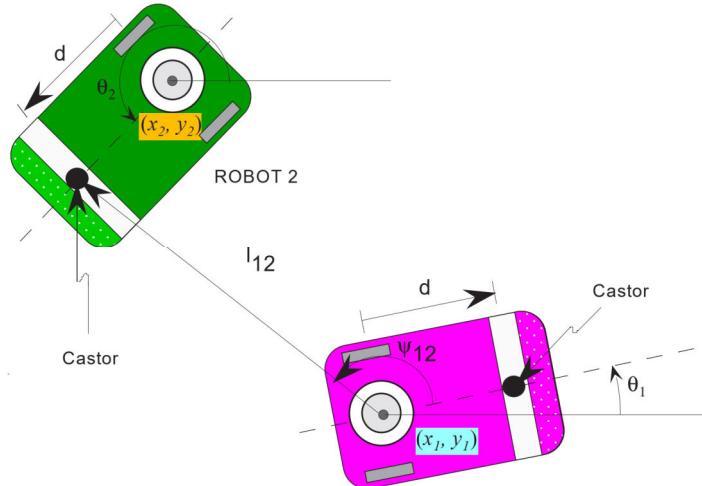


Hình 1. 14. Điều khiển đội hình leader-follower [26].

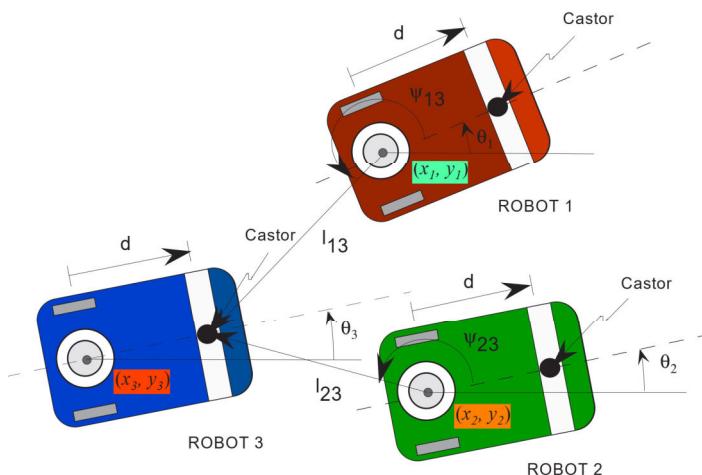
Hai phương pháp điều khiển leader-follower phổ biến có thể kể đến là điều khiển  $l-\psi$  cho “nhóm” gồm một leader một follower và điều khiển  $l-l$  cho “nhóm” gồm hai leader một follower, được giới thiệu bởi J. P. Desai, J. Ostrowski và V. Kumar trong các tài liệu [22, 27]. Theo đó, các biến ràng buộc của đội hình được định nghĩa là góc

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

lệch tương đối  $\psi$  và khoảng cách tương đối  $l$  từ follower so với leader ( $l - \psi$ ) hay các khoảng cách  $l_{13}$  và  $l_{23}$  từ follower đến hai leader ( $l - l$ ).



Hình 1. 15. Điều khiển leader-follower theo  $l - \psi$  [22].



Hình 1. 16. Điều khiển leader-follower theo  $l - l$  [22].

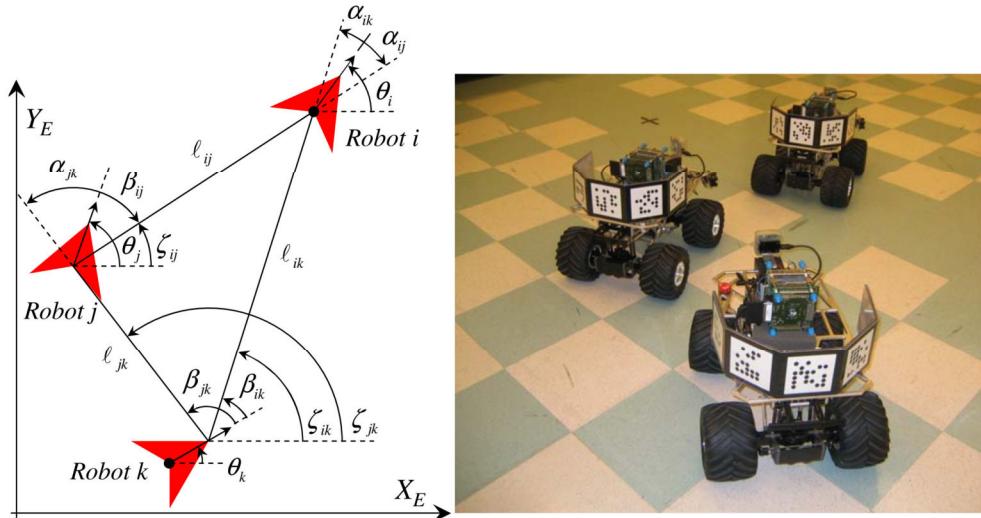
Ưu điểm của phương pháp điều khiển leader-follower là dễ tiếp cận và thực hiện, không yêu cầu các thiết bị định vị và giám sát. Tuy nhiên, nhược điểm dễ thấy của mô hình là không có phản hồi từ các follower gửi về cho leader. Do vậy, nếu follower bị tác động bởi nhiều, đội hình sẽ không còn được duy trì. Ngoài ra trạng thái của robot leader phải liên tục được gửi đến cho các follower, bởi hầu như trong các luật điều khiển áp dụng cho follower, các giá trị đó được sử dụng là tín hiệu vào của bộ điều khiển, do vậy yêu cầu cần phải hạn chế mất thông tin giữa các robot để việc điều khiển chính xác hơn.

Mặc dù vẫn còn một vài hạn chế nhưng phương pháp điều khiển leader-follower vẫn luôn được đánh giá cao bởi tính đơn giản và khả năng mở rộng của mô hình. Và trong các ứng dụng điều khiển hợp tác, phương pháp điều khiển leader-follower được nghiên cứu và áp dụng phổ biến hơn cả. Do vậy, đã có nhiều thuật toán điều khiển

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

leader-follower được nghiên cứu nhằm cải thiện và nâng cao chất lượng điều khiển. Theo tài liệu [28], E. Panteley cùng các cộng sự đã đề xuất một luật điều khiển leader-follower dựa trên cấu trúc điều khiển tầng (cascade-based controller) áp dụng cho hệ hai robot. Mô hình trên được E. Lefeber và J. Jakubia cải tiến trong các tài liệu [29, 30]. Tuy nhiên, các luật điều khiển trên đều giả định rằng tốc độ góc của robot leader phải khác không, nghĩa là bộ điều khiển sẽ không đáp ứng trong trường hợp robot leader di chuyển theo quỹ đạo đường thẳng. Một số nghiên cứu mới hơn đã giải quyết được bài toán trên [10, 31, 32, 33, 34, 35]. Theo tài liệu [10, 31], A. Loria và các cộng sự đã đề xuất một luật điều khiển cho phép các robot di chuyển theo đường thẳng, áp dụng cho hệ một leader một follower và mở rộng cho đội hình gồm nhiều robot. Theo [32, 33], nhóm nghiên cứu của Ti-Chung Lee đã đề xuất thuật toán điều khiển cho phép đội hình robot di chuyển theo các quỹ đạo đặc biệt như đường thẳng, đường cong và tốc độ của các robot có thể bằng không. Bên cạnh đó, K. Cao đã giới thiệu thuật toán điều khiển cho phép tốc độ của các robot trong quá trình di chuyển có thể bằng không tại một vài thời điểm [34, 35]. Cơ sở thiết kế các luật điều khiển trên đều dựa trên mô hình động học của robot, các thí nghiệm kiểm chứng chỉ dừng lại ở kết quả mô phỏng. Trong các nghiên cứu mới hơn, A. K. Das và các cộng sự đã đề xuất thuật toán điều khiển leader-follower cho đội hình robot [36]. Các biến ràng buộc của luật điều khiển được biểu diễn trên hệ tọa độ gắn với leader. Thuật toán này cho phép các robot giữ vững đội hình hoặc thay đổi đội hình tùy theo môi trường vật lý. Một số thí nghiệm thực tế đã được thực hiện trong nhiệm vụ vận chuyển, áp dụng cho cả cấu trúc điều khiển tập trung và điều khiển phân tán. Bên cạnh đó, nhóm nghiên cứu của Omar A. A. Orqueda và R. Fierro cũng đã thực hiện thí nghiệm điều khiển đội hình leader-follower sử dụng camera để xác định khoảng cách và góc lệch giữa các robot [37]. Theo các tài liệu [38, 39, 40], L. Consolini và các cộng sự đã đề xuất thuật toán leader-follower với điểm khác biệt so với mô hình của A. K. Das là góc lệch giữa robot leader và follower được biểu diễn trên hệ tọa độ gắn với robot follower.

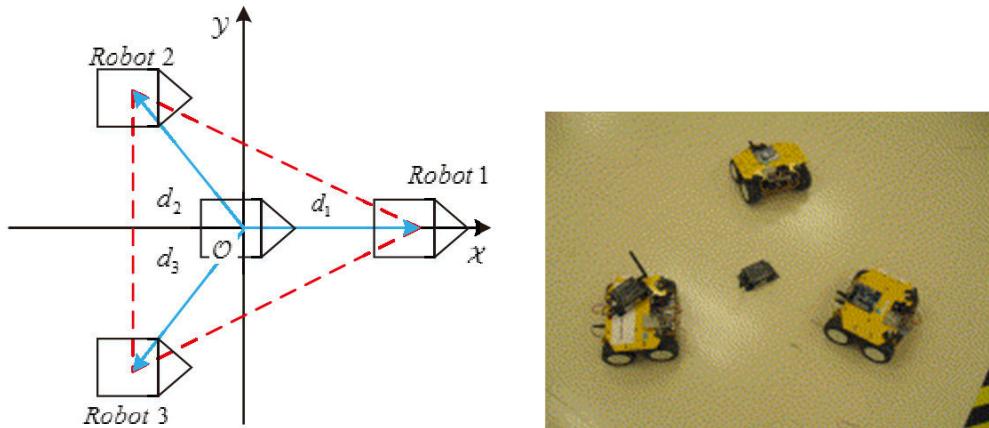
Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 1. 17. Điều khiển đội hình leader-follower sử dụng camera [37].

#### ✚ Điều khiển virtual structure.

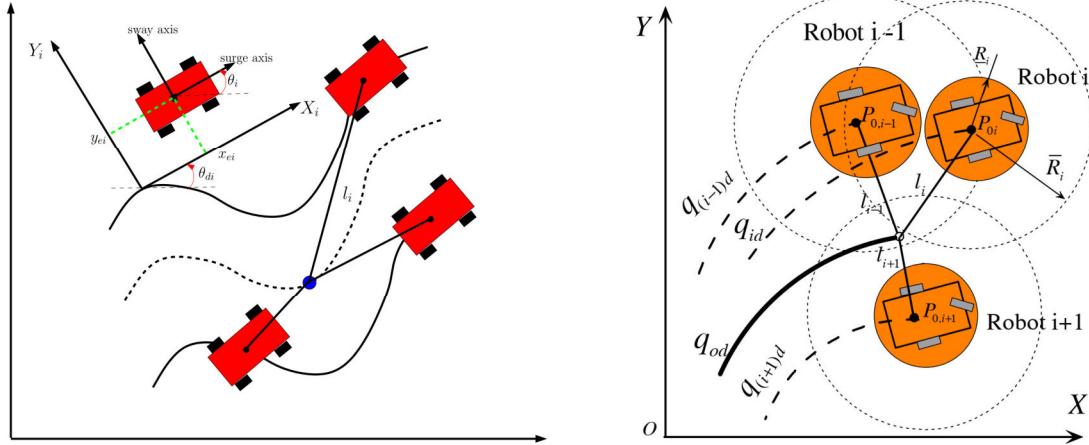
Trong phương pháp điều khiển virtual structure, đội hình robot được xem như một cấu trúc vật lý (hình vuông, hình tròn,...) và quỹ đạo tham chiếu của mỗi robot phụ thuộc vào chuyển động của điểm ảo (virtual center). Khi điểm ảo di chuyển, các robot sẽ di chuyển theo một quỹ đạo tương đối với điểm ảo, với các ràng buộc về khoảng cách để giữ đội hình không đổi.



Hình 1. 18. Điều khiển đội hình virtual-structure.

Phương pháp này được đề xuất lần đầu tiên bởi Kar-Han Tan và M. A. Lewis [41, 42]. Từ đó, nhiều thuật toán điều khiển đội hình cũng đã được nghiên cứu dựa theo cấu trúc này. Theo [43], J. Ghommam và các cộng sự đề xuất mô hình kết hợp giữa điều khiển virtual structure và điều khiển bám quỹ đạo (path following control) cho hệ nhiều robot di động. Theo [44, 45], nhóm nghiên cứu của T. H. A. van den Broek đã thực hiện các thí nghiệm điều khiển virtual-structure cho một nhóm robot được giám sát và điều khiển bởi camera và máy tính. Theo [46, 47], K. D. Do đề xuất một thuật toán điều khiển

đội hình virtual structure trong trường hợp phạm vi cảm biến bị giới hạn, đồng thời đảm bảo không có sự va chạm giữa các robot.



Hình 1. 19. Điều khiển virtual structure kết hợp bám quỹ đạo [43, 47].

Ưu điểm của phương pháp điều khiển virtual structure là tính bền vững, bởi sự ràng buộc chặt chẽ giữa các robot trong luật điều khiển, giúp đội hình luôn được duy trì. Tuy nhiên, điều này dẫn đến nhược điểm của mô hình là mô tả toán học và việc thiết kế luật điều khiển cho các robot cũng trở nên phức tạp hơn. Tương tự như phương pháp điều khiển behavior-based, phương pháp điều khiển virtual structure sử dụng cấu trúc điều khiển tập trung, do vậy sẽ gây hạn chế trong một số ứng dụng.

Bên cạnh những phương pháp điều khiển chính được giới thiệu ở trên, một số phương pháp điều khiển nâng cao khác cũng được kết hợp để nâng cao chất lượng điều khiển như: điều khiển thích nghi (adaptive control) [48, 49, 50, 51], điều khiển bền vững (robust control) [37, 52, 53], điều khiển dự báo (model predictive control) [54, 55], điều khiển trượt (sliding-mode control) [56, 57],...

### 1.3. Đóng góp của đề tài.

- Bước đầu nghiên cứu về điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đổi tượng, áp dụng cho hệ robot di động.
- Ứng dụng và tiềm năng của điều khiển hợp tác và ứng dụng điều khiển đội hình robot di động trong các nhiệm vụ hợp tác.
- Là cơ sở, định hướng nghiên cứu cho các đề tài tiếp theo.
- Mô hình thực nghiệm hỗ trợ trong công tác giảng dạy.

### 1.4. Bố cục của đề tài.

Trong chương này đã tìm hiểu các vấn đề chính:

- **Thứ nhất:** Tổng quan về điều khiển hợp tác trong hệ đa đổi tượng.
- **Thứ hai:** Thực tiễn và tiềm năng của điều khiển hợp tác.
- **Thứ ba:** Vấn đề điều khiển đội hình trong hệ robot di động.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

⇒ **Đề tài này nghiên cứu điều khiển đội hình mà cốt lõi là phương pháp điều khiển leader-follower, áp dụng cho hệ robot di động. Cấu trúc điều khiển phân tán được sử dụng trong vấn đề điều khiển đội hình. Bố cục sơ lược các chương của đề tài như sau:**

Chương 2: Mô hình toán học của hệ thống.

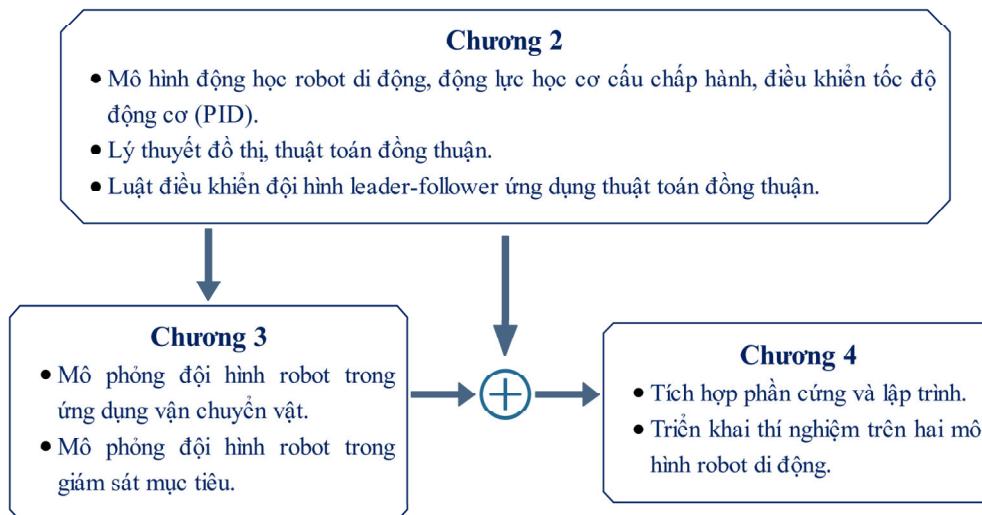
Chương này nghiên cứu cơ sở toán học và xây dựng cấu trúc điều khiển cho hệ robot di động, bao gồm: mô hình động học của robot, động lực học cơ cấu chấp hành, điều khiển PID điều khiển tốc độ động cơ; lý thuyết đồ thị; thuật toán đồng thuận và luật điều khiển đội hình leader-follower ứng dụng thuật toán đồng thuận.

Chương 3: Mô phỏng hệ thống.

Trong chương này, một số mô phỏng được thực hiện nhằm kiểm tra tính đúng đắn của luật điều khiển trong các ứng dụng hợp tác.

Chương 4. Thí nghiệm thực tế.

Tích hợp phần cứng và lập trình cho vi điều khiển. Triển khai thí nghiệm thực tế trên hai mô hình robot di động. Đánh giá và nhận xét, từ đó đề xuất hướng giải quyết, mở rộng nghiên cứu về sau.



Hình 1. 20. Bố cục sơ lược đề tài.

## CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỆ THỐNG.

### Nội dung chính:

---

2.1. Mô hình động học robot di động.....	15
2.2. Mô hình động lực học của robot.....	17
2.2.1. Mô hình toán học động cơ điện một chiều.....	18
2.2.2. Mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ.....	19
2.3. Lý thuyết đồ thị và thuật toán đồng thuận.....	21
2.3.1. Lý thuyết đồ thị – Graph Theory.....	21
2.3.2. Thuật toán đồng thuận – Consensus.....	23
2.4. Thuật toán điều khiển đội hình leader-follower.....	24
2.4.1. Giản đồ điều khiển đội hình – Control Graph.....	25
2.4.2. Luật điều khiển leader-follower cho đội hình hai robot.....	26
2.4.3. Luật điều khiển leader-follower cho đội hình nhiều robot.....	31
2.5. Điều khiển leader-follower ứng dụng thuật toán đồng thuận.....	33
2.6. Sơ đồ khối điều khiển chi tiết cho hệ robot.....	34
2.7. Kết luận.....	34

---

Từ những vấn đề đã được thảo luận trong chương 1, trong chương này ta sẽ nghiên cứu chi tiết hơn về mô hình động học, động lực học robot di động, từ đó xây dựng luật điều khiển leader-follower cho đội hình robot được nghiên cứu dựa trên cấu trúc điều khiển phân tán, có xét đến ràng buộc về giới hạn tốc độ của robot. Các follower được điều khiển thông qua dữ liệu (vị trí, góc định hướng) được gửi đến từ robot lân cận, là leader tương ứng. Sự trao đổi thông tin giữa các robot trong một mạng lưới được mô hình hóa dựa trên lý thuyết đồ thị (graph theory).

### 2.1. Mô hình động học robot di động.

Mô hình động học được sử dụng để mô tả mối quan hệ giữa vị trí và tốc độ của robot. Chuyển động của robot được phân tích thông qua chuyển động của khối tâm

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

robot. Robot được sử dụng là loại chuyển động dựa trên hai bánh xe được điều khiển độc lập (differential drive wheeled mobile robot – DDWMR) và một bánh lái (casteर wheel). Do đó, có thể thay đổi quỹ đạo chuyển động của robot bằng cách thay đổi tốc độ các bánh xe.

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

Giả thiết các robot chuyển động không trượt, môi trường không có vật cản và không có nhiễu tác động lên robot. Phương trình vi phân mô tả chuyển động của robot:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2.1)$$

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

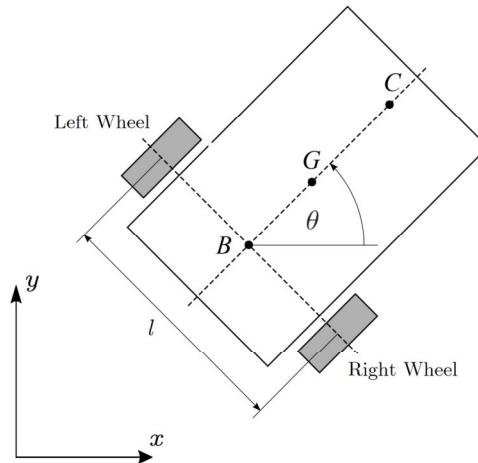
Hay:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Trong đó  $v[m / s]$ ,  $\omega[rad / s]$  lần lượt là vận tốc và vận tốc góc của robot, biểu diễn bởi vector  $\mathbf{u} = [v \ \omega]^T$ .

Trong thực tế, tốc độ của robot bị ràng buộc bởi các giới hạn:  $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$ , với  $v_{\max} > v_{\min} > 0$  và  $\omega \in [-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$ , với  $\omega_{\max} > 0$  là vận tốc cực đại và vận tốc góc cực đại của robot.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 2. 1. Mô hình robot trong hệ tọa độ  $xOy$ .

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

$$\begin{cases} v = \frac{r \cdot (\omega_R + \omega_L)}{2} \\ \omega = \frac{r \cdot (\omega_R - \omega_L)}{l} \end{cases} \quad (2.3)$$

Hay:

$$\begin{cases} \omega_R = \frac{v}{r} + \frac{l \cdot \omega}{2r} \\ \omega_L = \frac{v}{r} - \frac{l \cdot \omega}{2r} \end{cases} \quad (2.4)$$

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.

Với  $\Omega [rad / s]$  là tốc độ góc cực đại của bánh xe, ta có các giới hạn:

$$|v| \leq r\Omega; |\omega| \leq \frac{2r\Omega}{l}$$

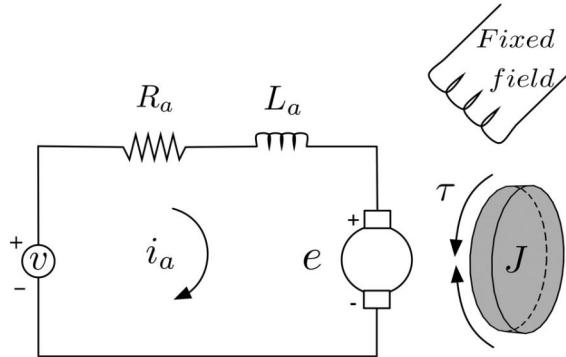
## 2.2. Mô hình động lực học của robot.

Mô hình động học không mô tả chính xác chuyển động thực tế của robot mà lực và momen là các thành phần gây nên chuyển động. Trong mục này, mô hình động lực học của robot sẽ được xét đến dựa trên mối quan hệ giữa chuyển động của robot với cơ cấu chấp hành là động cơ điện một chiều.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

### 2.2.1. Mô hình toán học động cơ điện một chiều.

Động cơ điện một chiều (DC Motor) được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng robot và là cơ cấu truyền động chính của robot di động. Do đó, việc phân tích động lực học của chúng trong mô hình chuyển động là hết sức quan trọng. Xét mô hình động cơ điện một chiều có mạch điện tương đương như hình vẽ:



Hình 2. 2. Mạch điện tương đương động cơ một chiều [58].

Momen điện từ sinh ra bởi động cơ:

$$\tau_m(t) = K_m \cdot i_a(t) \quad (2. 5)$$

Laplace hai vế, ta được:

$$\frac{T_m(s)}{I_a(s)} = K_m \quad (2. 6)$$

Suất điện động cảm ứng:

$$v_b(t) = K_b \omega(t) \quad (2. 7)$$

Điện áp phần ứng:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= v_{Ra}(t) + v_{La}(t) + v_b(t) \\ &= R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \omega(t) \end{aligned} \quad (2. 8)$$

Chuyển qua miền Laplace:

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + K_b \omega(s) \quad (2. 9)$$

Suy ra:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \omega(s)}{R_a + L_a s} \quad (2. 10)$$

Phương trình momen quay:

$$J \dot{\omega} + b\omega = \tau_m(t) - \tau_l(t) \quad (2. 11)$$

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

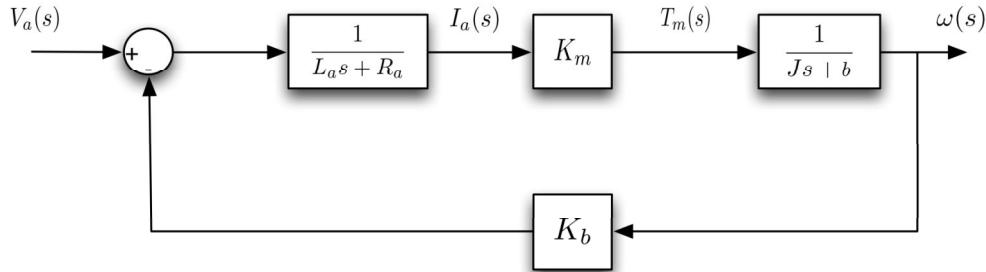
Bỏ qua  $\tau_l$ , laplace 2 vế, ta được hàm truyền tốc độ / momen:

$$\frac{\omega(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{Js + b} \quad (2.12)$$

Tổng hợp các phương trình trên ta được hàm truyền đạt tốc độ / điện áp của động cơ điện một chiều:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(Js + b) + K_m K_b} \quad (2.13)$$

Sơ đồ khối động cơ điện một chiều:



Hình 2. 3. Sơ đồ khối động cơ điện một chiều [58].

Trong đó:

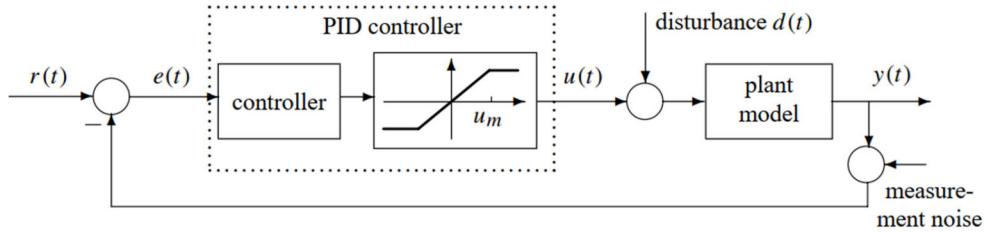
- $\omega [\text{rad} / \text{s}]$  là tốc độ động cơ.
- $v_a [V]$  là điện áp đặt vào hai cực động cơ.
- $i_a [A]$  là dòng điện trong mạch phản ứng.
- $R_a [\Omega]$  là điện trở phản ứng.
- $L_a [H]$  là điện cảm phản ứng.
- $J [kg.m^2 / rad]$  là momen quán tính của rotor.
- $b [N.m]$  là hệ số ma sát nhót.
- $K_b [V.s / rad]$  là hằng số back-EMF constant.
- $K_m [N.m.A^{-1}]$  là hằng số momen.

### 2.2.2. Mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ.

Trong thực tế, điều khiển chuyển động robot tức là ta điều khiển tốc độ các bánh xe, bởi các tín hiệu đặt vào mỗi động cơ chính là các giá trị tốc độ tham chiếu được chuyển đổi từ vận tốc và vận tốc góc của robot thông qua phép biến đổi (2.4). Vì tốc độ các robot thay đổi liên tục nên tốc độ của các động cơ sẽ luôn thay đổi. Yêu cầu đặt ra

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

là phải điều khiển chính xác tốc độ của robot, mà điều này không thể đạt được khi chỉ sử dụng điều khiển vòng hở. Do vậy, thiết kế bộ điều khiển tốc độ cho các động cơ là cần thiết để đảm bảo robot luôn di chuyển với tốc độ yêu cầu. PID là bộ điều khiển được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển vòng kín cũng như trong các ứng dụng điều khiển tốc độ động cơ bởi cấu trúc đơn giản và dễ áp dụng. Sơ đồ điều khiển vòng kín sử dụng bộ điều khiển PID như hình vẽ:



Hình 2. 4. Sơ đồ điều khiển vòng kín sử dụng PID [59].

Phương trình toán học của bộ điều khiển PID:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.14)$$

Trong đó:

- $u(t)$  là tín hiệu điều khiển.
- $r(t)$  là tín hiệu tham chiếu.
- $e(t) = r(t) - y(t)$  là tín hiệu sai lệch.
- $T_i, T_d$  là hằng số thời gian của khâu tích phân (I) và khâu vi phân (D).

Khi đó, hàm truyền của bộ điều khiển PID:

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.15)$$

Trong đó:

- $K_p$  là hệ số của khâu khuếch đại.
- $K_i$  là hệ số của khâu tích phân.
- $K_d$  là hệ số của khâu vi phân.

Tuy nhiên, để thực thi bộ điều khiển PID, ta cần chuyển đổi PID từ dạng liên tục sang dạng rời rạc. Phương pháp đơn giản nhất là sử dụng xấp xỉ hình thang cho khâu tích phân và xấp xỉ sai lệch ngược cho khâu vi phân [60]:

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

$$\int_0^t e(t)dt \approx \sum_{k=1}^n T_s \cdot e(kT_s) \quad (2.16)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT_s) - e(kT_s - T_s)}{T_s} \quad (2.17)$$

Từ đó ta có:

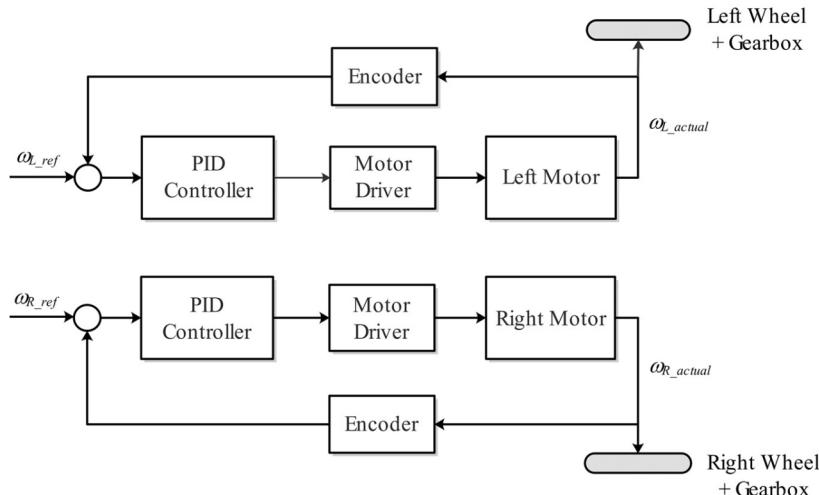
$$u(kT_s) = K_p \left[ e(kT_s) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{k=1}^n e(kT_s) + T_d \frac{e(kT_s) - e(kT_s - T_s)}{T_s} \right] \quad (2.18)$$

Sử dụng phép biến đổi  $Z$ , hàm truyền của bộ điều khiển PID số:

$$G_{PID}(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p \left[ 1 + \frac{T_s}{T_i(1-z^{-1})} + T_d \frac{(1-z^{-1})}{T_s} \right] \quad (2.19)$$

Trong đó:  $T_s$  là thời gian lấy mẫu.

Xét hệ robot di động hai bánh xe được truyền động bởi hai động cơ điện một chiều có mô hình toán học như trên. Theo đó, để điều khiển tốc độ động cơ, ta phải thay đổi điện áp cấp cho động cơ đó. Encoder đo tốc độ thực tế của động cơ, phản hồi về bộ điều khiển PID. Từ sai lệch tốc độ, PID tính toán giá trị điện áp cấp vào động cơ để đạt đến tốc độ yêu cầu (sai lệch về 0).



Hình 2. 5. Mạch vòng điều khiển tốc độ động cơ.

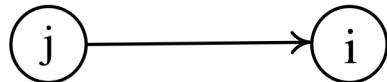
### 2.3. Lý thuyết đồ thị và thuật toán đồng thuận.

#### 2.3.1. Lý thuyết đồ thị – Graph Theory.

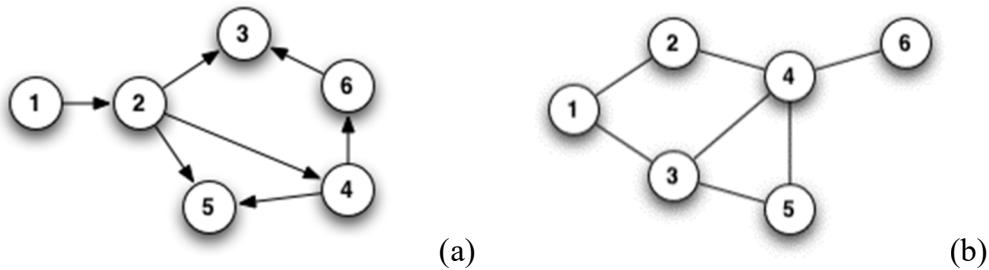
Xét một hệ đa đổi tượng gồm  $(n+1)$  phần tử, trong đó phần tử thứ 0 là phần tử “không điều khiển” được gọi là “leader”,  $n$  phần tử còn lại theo thứ tự  $i = 1, \dots, n$  là

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

“follower”. 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. 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  $E_n = \{(j, i) : j \neq i; i, j \in V_n\}$  là tập hợp các biên của đồ thị. Tùy thuộc vào tính chất truyền đi của dữ liệu mà ta có đồ thị có hướng (directed graph) và đồ thị vô hướng (undirected graph). Một đồ thị được gọi là đồ thị có hướng (hình 2.7-a) nếu  $V_n = \{1, \dots, n\}$  là tập hợp các nút và  $E_n$  là tập hợp có thứ bậc các biên. Kết hợp đồ thị  $G_n$  và nút 0 (leader) ta được đồ thị  $\bar{G}_n \triangleq (\bar{V}_n, \bar{E}_n)$ , trong đó  $\bar{V}_n = V_n \cup \{0\}$  và  $\bar{E}_n$  gồm  $E_n$  và các biên có hướng nối từ nút 0 đến các nút  $i, i \in V_n$ . Một biên có hướng  $(j, i)$  với  $j \neq i, j \in \bar{V}_n, i \in V_n$  biểu thị rằng phần tử  $i$  có thể nhận dữ liệu được gửi đến từ phần tử  $j$  nhưng dữ liệu không được nhận theo chiều ngược lại (hình 2.6). Với mỗi biên  $(j, i) \in \bar{E}_n$ ,  $j$  gọi là nút mẹ (parent) và  $i$  được gọi là nút con (child). Khi đó, nút  $j$  được gọi là phần tử lân cận (neighbor) của nút  $i$  và tập hợp các phần tử lân cận của nút  $i$  được định nghĩa là  $N_i$ .



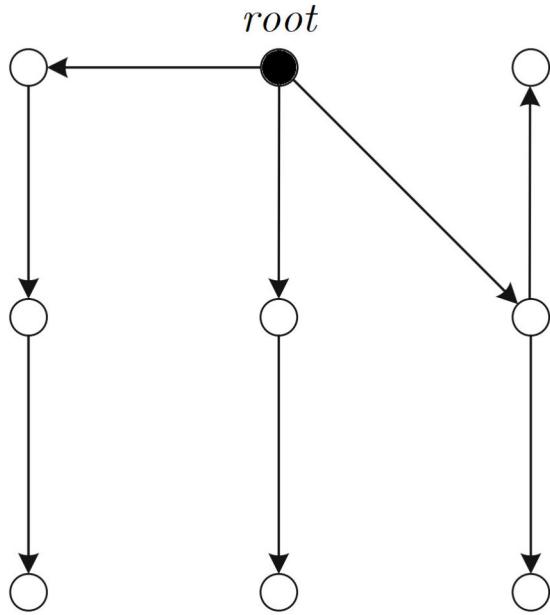
Hình 2. 6. Dòng chảy thông tin từ nút  $j$  đến nút  $i$ .



Hình 2. 7. 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 với mỗi biên  $(i, j)$ , các phần tử  $i$  và  $j$  có thể tiếp nhận thông tin lẫn nhau, hay nói cách khác thông tin được nhận theo hai chiều (hình 2.7-b). Để ý rằng, một đồ thị vô hướng có thể xem như trường hợp đặc biệt của đồ thị có hướng, với mỗi biên  $(i, j)$  trong đồ thị vô hướng tương ứng với các biên  $(i, j)$  và  $(j, i)$  trong đồ thị có hướng.

Ngoài ra, 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 (directed spanning tree) trong đồ thị có hướng là một cây có hướng được tạo bởi các biên kết nối 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, cấu trúc đồ thị đội hình leader-follower có thể xem như là một cây mở rộng với leader chính là rễ.



Hình 2. 8. Đồ thị cây mở rộng (directed spanning tree).

Xét các phần tử chuyển động trong không gian  $\mathbb{R}^2$ . Trạng thái của phần tử thứ  $i$  và  $j$  được biểu diễn bởi  $\mathbf{p}_i = [\chi_i \ \gamma_i]^T \in \mathbb{R}^2$  và  $\mathbf{p}_j = [\chi_j \ \gamma_j]^T \in \mathbb{R}^2$ , trong đó  $(\chi_i(t), \gamma_i(t))$  và  $(\chi_j(t), \gamma_j(t))$  lần lượt là vị trí của nút  $i$  và  $j$  trong hệ tọa độ  $xy$ . Chuyển động của các phần tử phải đảm bảo tránh sự va chạm với phần tử lân cận (quy luật Reynolds). Lúc này, đồ thị tương tác giữa các phần tử được giả định là một đồ thị vô hướng. Đặt  $\delta_{ij}$  với  $\delta_{ij} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(\chi_j - \chi_i)^2 + (\gamma_j - \gamma_i)^2}$  là khoảng cách giữa hai nút, thì  $\delta_{ij} \geq \delta_{\min} > 0$  với  $\delta_{\min}$  là khoảng cách tối thiểu để tránh xảy ra va chạm.

### 2.3.2. Thuật toán đồng thuận – Consensus.

Như đã giới thiệu trong chương trước, trong điều khiển hệ đa đối tượng, 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. Thuật toán đồng thuận (consensus) được áp dụng để phân tán thông tin, các phần tử trong hệ cập nhật dữ liệu của chúng dựa trên trạng thái dữ liệu của phần tử lân cận (neighbor-to-neighbor).

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Như vậy, mục tiêu điều khiển 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. Tùy theo mục đích ứng dụng và tính chất của đổi tượng trong hệ, những thông tin này có thể là vị trí, vận tốc, góc lệch, v.v. Ở đây ta giả sử 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 được gắn trên mỗi phần tử.

Xét một hệ đa đổi tượng và sự trao đổi thông tin trong hệ được mô tả bởi đồ thị  $\bar{G}_n(\bar{V}_n, \bar{E}_n)$ . Giả sử rằng thông tin của phần tử trong hệ được mô tả dưới dạng phương trình vi phân bậc nhất:

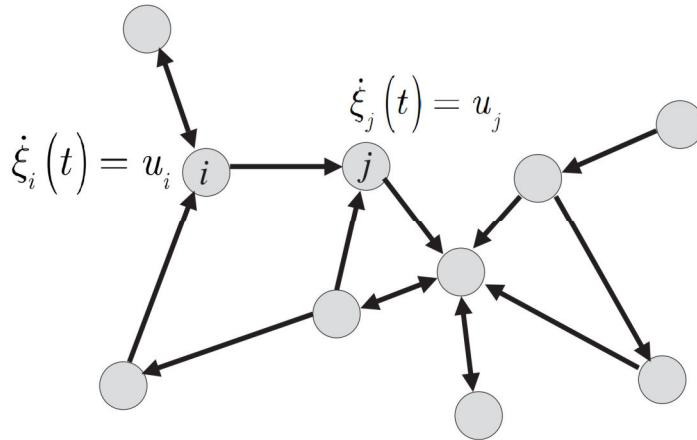
$$\dot{\xi}_i(t) = u_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.20)$$

Trong đó  $\xi_i(t) \in \mathbb{R}$  là trạng thái của phần tử thứ  $i$  tại thời điểm  $t$ ,  $u_i \in \mathbb{R}$  là tín hiệu điều khiển.

Khi đó, thuật toán đồng thuận tổng quát được xác định [11, 12, 61]:

$$u_i = \sum_{j \in N_i(t)} k_{ij}(t) [\xi_j(t) - \xi_i(t)], \quad i = 1, \dots, n \quad (2.21)$$

Với  $N_i(t)$  là tập hợp các phần tử mà thông tin của chúng là “khả dụng” với phần tử  $i$  tại thời điểm  $t$ ;  $k_{ij}(t)$  là trọng số kết nối. Từ phương trình trên ta thấy, sự đồng thuận giữa các phần tử trong hệ đạt được (tiệm cận) nếu  $\xi_i(t) \rightarrow \xi_j(t)$ ,  $\forall i \neq j$  hay  $\|\xi_i(t) - \xi_j(t)\| \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$  với mọi  $\xi_i(0)$ .



Hình 2.9. Đồng thuận thông tin trong hệ đa đổi tượng.

#### 2.4. Thuật toán điều khiển đội hình leader-follower.

Cơ sở lý thuyết của thuật toán điều khiển leader-follower được trình bày dựa trên kết quả của các tác giả F. Morbidi (xem [26]) và tác giả L. Consolini (xem [38, 39, 40]).

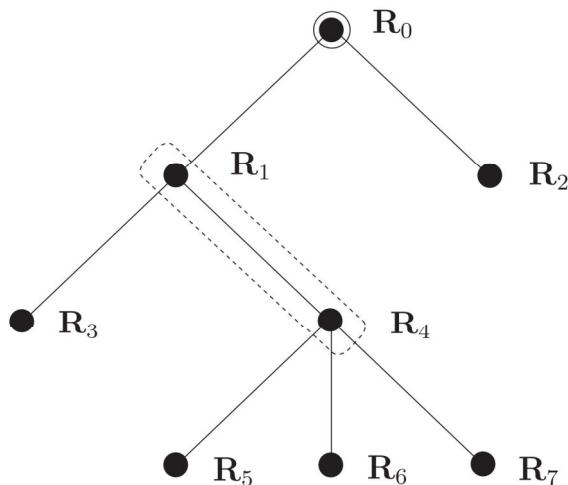
Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Ngoài ra có tham khảo các tài liệu của J. P. Desai [22] và A. K. Das [36]. Chi tiết có thể xem thêm trong mục Tài liệu tham khảo.

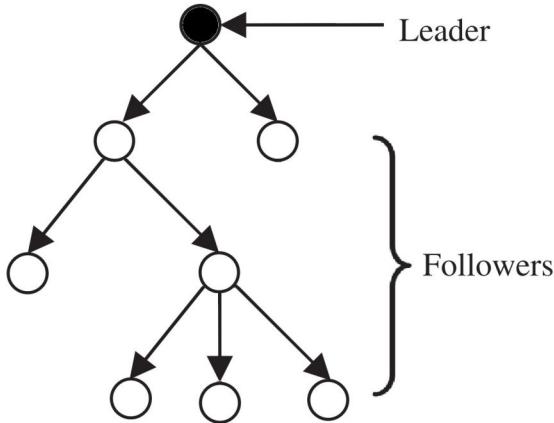
#### 2.4.1. Giản đồ điều khiển đội hình – Control Graph.

Như đã giới thiệu ở trên, trong một hệ đa đổi tượng, sự trao đổi thông tin giữa các phần tử được mô tả dưới dạng đồ thị (graph). Áp dụng vào điều khiển đội hình leader-follower, mối quan hệ giữa mỗi robot và các robot lân cận được mô tả bởi sơ đồ hình học “giản đồ điều khiển” (control graph). Mỗi robot được xem là một nút (node) và kết nối giữa hai robot lân cận là một biên trong giản đồ đó. 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.

Xét một đội hình các robot được đánh số từ 0 đến  $N$ . Khi đó robot  $R_0$  là leader,  $N$  robot còn lại là follower. Từ một cặp leader-follower, ta mở rộng đội hình theo thứ bậc (hierarchical formation). Chuyển động của các follower phụ thuộc vào leader tương ứng của nó, nghĩa là trong đội hình có thể có nhiều leader điều khiển các follower, nhưng chỉ duy nhất  $R_0$  là leader chính. Khi đó  $R_0$  là rễ (root) trong đội hình cây mở rộng. Theo giản đồ trên,  $R_0$  là leader tương ứng của  $R_1$  và  $R_2$ ,  $R_4$  là leader tương ứng của  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ .



Hình 2. 10. Giản đồ điều khiển đội hình (control graph) [26].



Hình 2. 11. Dòng chảy thông tin trong đội hình leader-follower.

#### 2.4.2. Luật điều khiển leader-follower cho đội hình hai robot.

##### ➡ Đặt vấn đề:

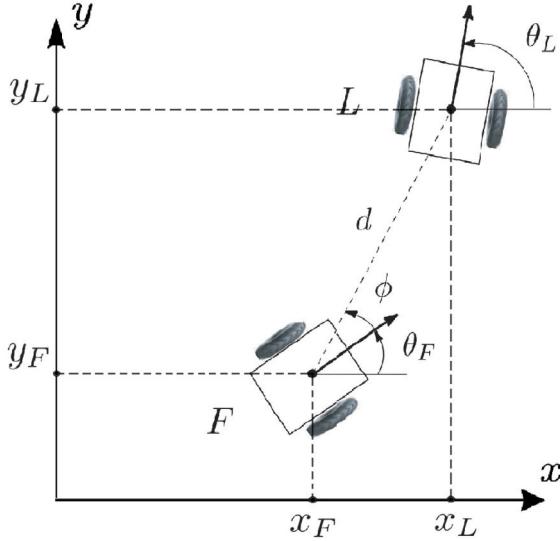
Giả định rằng các robot di chuyển trong môi trường không có vật cản. Xét trường hợp đơn giản nhất, điều khiển leader-follower cho hệ hai robot gồm leader  $\mathbf{R}_L$  và follower  $\mathbf{R}_F$  lần lượt có phương trình động học:

$$\begin{cases} \dot{x}_L = v_L \cos \theta_L \\ \dot{y}_L = v_L \sin \theta_L \\ \dot{\theta}_L = \omega_L \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_F = v_F \cos \theta_F \\ \dot{y}_F = v_F \sin \theta_F \\ \dot{\theta}_F = \omega_F \end{cases} \quad (2.23)$$

Trong đó:  $\mathbf{L} = (x_L, y_L)$ ,  $\mathbf{F} = (x_F, y_F)$  lần lượt là các vector biểu diễn vị trí của leader và follower;  $\theta_L, \theta_F$  là góc định hướng chuyển động của các robot;  $v_L, v_F$  và  $\omega_L, \omega_F$  là vận tốc và vận tốc góc của robot leader và follower.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 2. 12. Điều khiển đội hình leader-follower hai robot.

Đặt khoảng cách  $d > 0$  và góc  $\phi : |\phi| < \frac{\pi}{2}$  là các biến ràng buộc giữa hai robot.

Khi đó, các robot được gọi là tạo thành đội hình  $(d, \phi)$  nếu  $\forall t \geq 0$ :

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix}(t) = \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \end{pmatrix}(t) + d \begin{pmatrix} \cos(\theta_F + \phi) \\ \sin(\theta_F + \phi) \end{pmatrix}$$

Trong đó, khoảng cách  $d$  và góc  $\phi$  lệch được định nghĩa:

$$d = \| \mathbf{L}(t) - \mathbf{F}(t) \| = \sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2} \quad (2.24)$$

$$\phi = \arg(\mathbf{L}(t) - \mathbf{F}(t)) - \theta_F = \arctan\left(\frac{y_L - y_F}{x_L - x_F}\right) - \theta_F \quad (2.25)$$

Ngoài ra, đặt  $\beta = \theta_L - \theta_F$  là sai lệch góc định hướng giữa hai robot.

Để ý rằng, đội hình tồn tại khi khoảng cách  $d$  giữa leader và follower phải thỏa mãn  $d \geq d_{\min} > 0$ , trong đó  $d_{\min}$  là khoảng cách tối thiểu để tránh xảy ra va chạm nội giữa các robot trong quá trình di chuyển.

Giả sử hai robot xuất phát từ vị trí ban đầu  $t = 0$ , tại đó chúng tạo thành đội hình  $(d, \phi)$ . Khi đó, có thể xem như robot leader  $\mathbf{R}_L$  và robot follower  $\mathbf{R}_F$  tạo thành đội hình  $(d, \phi)$   $\forall t \geq 0$  nếu các giá trị  $d$  và  $\phi$  luôn giữ không đổi theo thời gian. Như vậy, yêu cầu đặt ra là tìm một luật điều khiển cho robot follower tương ứng với chuyển động của robot leader để các phương trình (2.24) và (2.25) thỏa mãn với mọi  $t$ , nghĩa là các

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

giá trị  $d$  và  $\phi$  được giữ gần đúng với giá trị tham chiếu  $d^{ref}$  và  $\phi^{ref}$ . Ngoài ra, tốc độ của các robot bị ràng buộc bởi những giới hạn:

$$v_L \in [v_{L\min}, v_{L\max}], v_{L\max} > v_{L\min} > 0; \omega_L \in [-\omega_{L\max}, \omega_{L\max}], \omega_{L\max} > 0$$

$$v_F \in [v_{F\min}, v_{F\max}], v_{F\max} > v_{F\min} > 0; \omega_F \in [-\omega_{F\max}, \omega_{F\max}], \omega_{F\max} > 0$$

#### ⊕ Xây dựng luật điều khiển:

Từ (2. 24), lấy đạo hàm của  $d$  theo thời gian, ta có:

$$\dot{d} = \frac{(x_L - x_F)(\dot{x}_L - \dot{x}_F) + (y_L - y_F)(\dot{y}_L - \dot{y}_F)}{\sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}}$$

Kết hợp (2. 22) và (2. 23), ta được:

$$\dot{d} = \frac{(x_L - x_F)(v_L \cos \theta_L - v_F \cos \theta_F) + (y_L - y_F)(v_L \sin \theta_L - v_F \sin \theta_F)}{\sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}} \quad (2. 26)$$

Nếu đặt:

$$A = \frac{x_L - x_F}{\sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}}$$

Thì:

$$\frac{y_L - y_F}{\sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}} = 1 - A^2$$

Đặt  $\psi = \arctan \left( \frac{y_L - y_F}{x_L - x_F} \right)$  thì  $\psi - \theta_F = \phi$ . Suy ra:  $A = \cos \psi$  và  $1 - A^2 = \sin \psi$ .

Khi đó, từ (2. 26) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{d} &= \cos \psi (v_L \cos \theta_L - v_F \cos \theta_F) + \sin \psi (v_L \sin \theta_L - v_F \sin \theta_F) \\ &= v_L \cos \theta_L \cos \psi - v_F \cos \psi \cos \theta_F + v_L \sin \theta_L \sin \psi - v_F \sin \psi \sin \theta_F \\ &= -v_F (\cos \psi \cos \theta_F + \sin \psi \sin \theta_F) + v_L (\cos \theta_L \cos \psi + \sin \theta_L \sin \psi) \\ &= -v_F \cos(\psi - \theta_F) + v_L \cos(\theta_L - \psi) \end{aligned}$$

Vì  $\psi - \theta_F = \phi$  và  $\beta = \theta_L - \theta_F$  nên  $\theta_L - \psi = \beta - \phi$ . Suy ra:

$$\boxed{\dot{d} = -v_F \cos \phi + v_L \cos(\beta - \phi)} \quad (2. 27)$$

Tương tự, từ (2. 25) ta có:

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

$$\arctan\left(\frac{y_L - y_F}{x_L - x_F}\right) = \phi + \theta_F \quad (2.28)$$

Suy ra:

$$\frac{y_L - y_F}{x_L - x_F} = \tan(\phi + \theta_F) \quad (2.29)$$

Lấy đạo hàm hai vế phương trình (2.29), ta được:

$$\begin{aligned} \frac{(\dot{y}_L - \dot{y}_F)(x_L - x_F) - (y_L - y_F)(\dot{x}_L - \dot{x}_F)}{(x_L - x_F)^2} &= \frac{\dot{\phi} + \dot{\theta}_F}{\cos^2(\phi + \theta_F)} \\ \Leftrightarrow \frac{(x_L - x_F)(v_L \sin \theta_L - v_F \sin \theta_F) - (y_L - y_F)(v_L \cos \theta_L - v_F \cos \theta_F)}{(x_L - x_F)^2} &= \frac{\dot{\phi} + \dot{\theta}_F}{\cos^2(\phi + \theta_F)} \end{aligned}$$

Suy ra:

$$\dot{\phi} = \frac{v_F [(y_L - y_F) \cos \theta_F - (x_L - x_F) \sin \theta_F] + v_L [(x_L - x_F) \sin \theta_L - (y_L - y_F) \cos \theta_L]}{(x_L - x_F)^2} \cdot \cos^2(\phi + \theta_F) - \omega_F$$

Ta lại có:

$$\cos^2(\phi + \theta_F) = \cos^2 \left[ \arctan \left( \frac{y_L - y_F}{x_L - x_F} \right) \right] = \cos^2 \psi$$

$$\text{Mà } \cos \psi = \frac{x_L - x_F}{\sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}} = \frac{x_L - x_F}{d} \text{ (theo trên).}$$

Suy ra:

$$\cos^2(\phi + \theta_F) = \cos^2 \psi = \frac{(x_L - x_F)^2}{d^2}$$

$$\text{Hơn nữa } \sin \psi = \frac{y_L - y_F}{\sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}} = \frac{y_L - y_F}{d} \text{ (theo trên).}$$

Do đó:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{v_F [(y_L - y_F) \cos \theta_F - (x_L - x_F) \sin \theta_F] + v_L [(x_L - x_F) \sin \theta_L - (y_L - y_F) \cos \theta_L]}{d^2} - \omega_F \\ &= \frac{v_F (\sin \psi \cos \theta_F - \cos \psi \sin \theta_F)}{d} + \frac{v_L (\sin \theta_L \cos \psi - \cos \theta_L \sin \psi)}{d} - \omega_F \\ &= \frac{v_F \sin(\psi - \theta_F)}{d} + \frac{v_L \sin(\theta_L - \psi)}{d} - \omega_F \end{aligned}$$

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Mà  $\psi - \theta_F = \phi$  và  $\theta_L - \psi = \beta - \phi$  (theo trên), khi đó ta được:

$$\boxed{\dot{\phi} = \frac{v_F \sin \phi}{d} + \frac{v_L \sin(\beta - \phi)}{d} - \omega_F} \quad (2.30)$$

Tại thời điểm ban đầu  $t = 0$ , các robot tạo thành đội hình  $(d, \phi)$ , các robot tạo thành đội hình  $(d, \phi)$  với mọi  $t \geq 0$  khi và chỉ khi giá trị  $d$  và  $\phi$  luôn được giữ gần đúng với giá trị tham chiếu  $d^{ref}$  và  $\phi^{ref}$ . Do đó, nếu đặt  $\dot{d} = 0$ , ta được:

$$\dot{d} = 0 \Leftrightarrow -v_F \cos \phi + v_L \cos(\beta - \phi) = 0$$

Hay:

$$\boxed{v_F = v_L \frac{\cos(\beta - \phi)}{\cos \phi}} \quad (2.31)$$

Tương tự đặt  $\dot{\phi} = 0$ :

$$\begin{aligned} \dot{\phi} = 0 &\Leftrightarrow v_F \frac{\sin \phi}{d} - \omega_F + v_L \frac{\sin(\beta - \phi)}{d} = 0 \\ &\Leftrightarrow \omega_F = v_F \frac{\sin \phi}{d} + v_L \frac{\sin(\beta - \phi)}{d} \end{aligned}$$

Thay  $v_F$  vào phương trình trên, ta được:

$$\omega_F = v_L \frac{1}{d \cos \phi} [\cos(\beta - \phi) \sin \phi + \sin(\beta - \phi) \cos \phi]$$

Hay:

$$\boxed{\omega_F = v_L \frac{\sin \beta}{d \cos \phi}} \quad (2.32)$$

Xét sai lệch góc định hướng giữa hai robot:  $\beta = \theta_L - \theta_F$ .

Lấy đạo hàm theo thời gian ta được:

$$\boxed{\dot{\beta} = \dot{\theta}_L - \dot{\theta}_F = \omega_L - \omega_F}$$

Với  $\omega_F$  được xác định theo (2.32), thực hiện phép biến đổi ta được:

$$\dot{\beta} = \omega_L - v_L \frac{\sin \beta}{d \cos \phi} = \frac{v_L}{d \cos \phi} \left( \frac{\omega_L}{v_L} d \cos \phi - \sin \beta \right)$$

Tốc độ robot leader bị ràng buộc:

$$v_L \in [v_{L\min}, v_{L\max}], v_{L\max} > v_{L\min} > 0; \omega_L \in [-\omega_{L\max}, \omega_{L\max}], \omega_{\max} > 0$$

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Đặt  $\kappa = \frac{\omega_L}{v_L}$  là quỹ đạo cong tức thời của robot leader. Khi đó ta có các giới hạn

chuyển động:

$$\begin{cases} v_{L\min} \leq v_L \leq v_{L\max} \\ -K \leq \kappa \leq K \end{cases}$$

Với  $K$  là quỹ đạo cong cực đại của robot leader.

Nếu tồn tại một thời điểm mà tại đó góc  $\beta$  được giữ không đổi, vì  $\frac{v_L}{d \cos \phi} \neq 0$  nên nếu đặt  $\dot{\beta} = 0$ :

$$\begin{aligned} \dot{\beta} = 0 &\Leftrightarrow Kd \cos \phi - \sin \beta = 0 \\ &\Leftrightarrow \sin \beta = Kd \cos \phi \end{aligned}$$

Khi đó  $\beta = \arcsin(Kd \cos \phi)$ .

Điều kiện để tồn tại góc  $\beta$  là  $-1 \leq Kd \cos \phi \leq 1$ . Vì  $|\phi| < \frac{\pi}{2}$  nên ta luôn có  $0 < \cos \phi \leq 1$ . Hơn nữa, vì  $K \geq 0$  và  $d > 0$  nên luôn có  $Kd \geq 0$ .

Do đó, phương trình trên tương đương:

$$\begin{cases} \beta = \arcsin(Kd \cos \phi) \\ Kd \leq 1 \end{cases}$$

Ta thấy rằng, góc  $\beta$  bị giới hạn. Nghĩa là nếu tại  $t = 0$ , các robot tạo thành đội hình  $(d, \phi)$ , và  $\arcsin(K^- d \cos \phi) \leq \beta(0) \leq \arcsin(K^+ d \cos \phi)$  thì đội hình được giữ theo thời gian  $\forall t \geq 0$  và  $\arcsin(K^- d \cos \phi) \leq \beta(t) \leq \arcsin(K^+ d \cos \phi)$ .

Như vậy, nếu tại thời điểm ban đầu  $t = 0$ , các robot tạo thành đội hình  $(d, \phi)$ , luật điều khiển (2.31) và (2.32) đặt ra vận tốc và vận tốc góc của follower tương ứng với vận tốc của leader và sai lệch góc định hướng  $\beta$  để  $\forall t \geq 0$ , các giá trị  $(d, \phi)$  luôn được giữ không đổi với giá trị tham chiếu  $(d^{ref}, \phi^{ref})$ , nghĩa là đội hình được giữ không đổi theo thời gian.

### 2.4.3. Luật điều khiển leader-follower cho đội hình nhiều robot.

Từ cơ sở thuật toán điều khiển leader-follower cho hệ hai robot  $\mathbf{R}_L, \mathbf{R}_F$ , ta mở rộng trường hợp tổng quát đội hình nhiều robot.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Đặt  $\mathbf{D} = \{d_i : d_i > 0, i = 1, \dots, n\}$  và  $\Phi = \{\phi_i : |\phi_i| < \frac{\pi}{2}, i = 1, \dots, n\}$  là hai bộ số cho trước. 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  $(\mathbf{D}, \Phi)$  tương ứng với các leaders  $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_{n_1}, \dots, \mathbf{R}_{n_n}$  nếu  $\forall t \geq 0, i = 1, \dots, n$ :

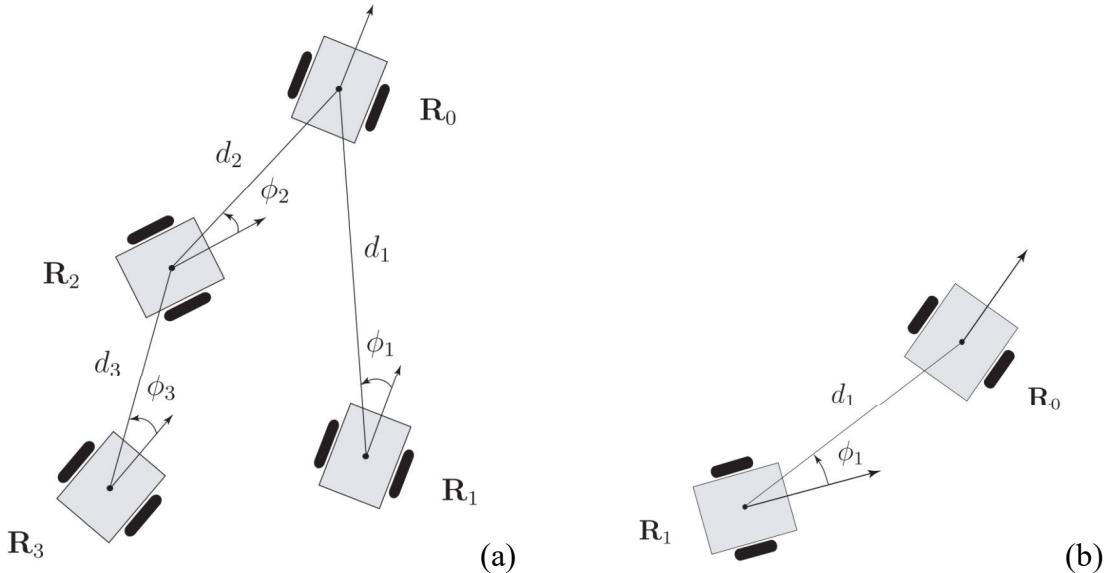
$$\begin{pmatrix} x_{n_i} \\ y_{n_i} \end{pmatrix}(t) = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}(t) + d_i \begin{pmatrix} \cos(\theta_i + \phi_i) \\ \sin(\theta_i + \phi_i) \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Trong đó các khoảng cách  $d_i$  và góc lệch  $\phi_i$  được định nghĩa:

$$d_i = \|\mathbf{R}_{n_i}(t) - \mathbf{R}_i(t)\| = \sqrt{(x_{n_i} - x_i)^2 + (y_{n_i} - y_i)^2} \quad (2.34)$$

$$\phi_i = \arg(\mathbf{R}_{n_i}(t) - \mathbf{R}_i(t)) - \theta_i = \arctan\left(\frac{y_{n_i} - y_i}{x_{n_i} - x_i}\right) - \theta_i \quad (2.35)$$

Ngoài ra, đặt  $\beta_i = \theta_{n_i} - \theta_i$  là sai lệch góc định hướng giữa một cặp leader-follower.



Hình 2.13. Điều khiển đội hình leader-follower nhiều robot.

Để ý rằng, nếu  $n = 1$  thì  $n_1 = 1 - 1 = 0$ , ta được đội hình hai robot với leader  $\mathbf{R}_0$  và follower  $\mathbf{R}_1$  (hình 2.13-b), tương ứng với đội hình  $(d, \phi)$  với leader  $\mathbf{R}_L$  và follower  $\mathbf{R}_F$  đã được xét đến trong mục 2.4.2. Hơn nữa, các khoảng cách  $d_i$  giữa mỗi cặp leader và follower phải thỏa mãn  $d_i \geq d_{\min} > 0$ , với  $d_{\min}$  là khoảng cách tối thiểu để tránh xảy ra va chạm nội giữa các robot trong quá trình di chuyển.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Theo (2.31) và (2.32), ta có luật điều khiển tổng quát:

$$\boxed{v_i = v_{n_i} \frac{\cos(\beta_i - \phi_i)}{\cos \phi_i}} \quad (2.36)$$

$$\boxed{\omega_i = v_{n_i} \frac{\sin \beta_i}{d_i \cos \phi_i}} \quad (2.37)$$

Khi đó, nếu tại thời điểm ban đầu  $t = 0$ , các robot tạo thành đội hình  $(D, \Phi)$ , luật điều khiển đặt ra vận tốc và vận tốc góc cho các follower theo vận tốc của leader tương ứng và sai lệch góc định hướng  $\beta_i$  để  $\forall t \geq 0$ , các giá trị trong bộ số  $(D, \Phi)$  luôn được giữ không đổi với giá trị tham chiếu  $(D^{ref}, \Phi^{ref})$ , nghĩa là đội hình được giữ không đổi theo thời gian.

## 2.5. Điều khiển leader-follower ứng dụng thuật toán đồng thuận.

Giả sử rằng các robot xuất phát từ các vị trí ban đầu tùy ý. Khi đó mục tiêu điều khiển là các robot follower di chuyển tạo thành đội hình với leader với các khoảng cách hình học mong muốn, nghĩa là các giá trị trong bộ số  $(D, \Phi)$  tiệm cận  $(D^{ref}, \Phi^{ref})$ . Khác với phương pháp được sử dụng trong [38, 39], đề tài này ứng dụng thuật toán đồng thuận để thiết kế thành phần bù sai lệch vị trí. Luật điều khiển được thiết kế áp dụng cho cấu trúc đồ thị hình cây mở rộng (spanning-tree graph) (hình 2.11), dựa trên sai lệch vị trí giữa mỗi cặp leader-follower:

$$p_{ix} = x_{n_i} - x_i - d_{n_i, i}^x \quad (2.38)$$

$$p_{iy} = y_{n_i} - y_i - d_{n_i, i}^y \quad (2.39)$$

Trong đó  $d_{n_i, i}^x$  và  $d_{n_i, i}^y$  là các khoảng cách tham chiếu theo hai phương và  $\sqrt{(d_{n_i, i}^x)^2 + (d_{n_i, i}^y)^2} = d_{n_i, i}$ . Với một đội hình có cấu trúc được định nghĩa, các khoảng cách này là các hằng số xác định.

Khi đó, luật điều khiển (2.36) và (2.37) được mở rộng như sau:

$$\boxed{\begin{aligned} v_i^* &= v_i + \bar{v}_i = v_i + K_v \cdot p_{ix} \\ \omega_i^* &= \omega_i + \bar{\omega}_i = \omega_i + K_\omega \cdot p_{iy} \end{aligned}} \quad (2.40)$$

Trong đó:  $\bar{v}_i = K_v \cdot p_{ix}$  và  $\bar{\omega}_i = K_\omega \cdot p_{iy}$  ( $K_v, K_\omega$  là các hằng số dương) là hai thành phần được thêm vào để các sai lệch vị trí bằng 0:

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p_{ix}(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} p_{iy}(t) = 0$$

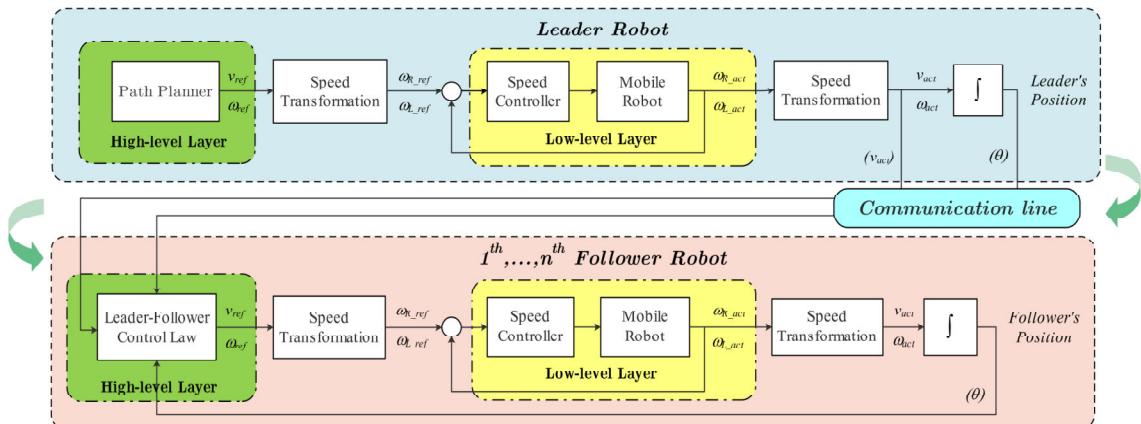
Nghĩa là khi  $t \rightarrow \infty$ ,  $\|\mathbf{R}_{n_i}(t) - \mathbf{R}_i(t)\| \rightarrow d_{n_i,i}$ . Hệ đạt được sự đồng thuận đội hình.

## 2.6. Sơ đồ khái niệm chi tiết cho hệ robot.

Từ mô hình động học của robot, động lực học cơ cấu chấp hành và luật điều khiển leader-follower, ta xây dựng sơ đồ khái niệm điều khiển cho hệ đa robot di động dựa trên cấu trúc điều khiển phân tán.

Về cơ bản, cấu trúc điều khiển ở mỗi robot được chia thành hai lớp:

- Lớp điều khiển cấp cao (high-level control layer) đóng vai trò quyết định trong chuyển động các robot. Ở robot leader là khái niệm vận tốc, ở các robot follower là bộ điều khiển leader-follower.
- Lớp điều khiển cấp thấp (low-level control layer) là bộ điều khiển tốc độ (speed controller) được thiết kế để điều khiển tốc độ robot thông qua tốc độ động cơ ở các bánh xe luôn giữ theo các giá trị tham chiếu được gửi đến từ lớp điều khiển cấp cao.



Hình 2. 14. Cấu trúc điều khiển hệ đa robot di động.

## 2.7. Kết luận.

Trong chương này đã nghiên cứu các vấn đề chính:

- Mô hình động học của robot và động lực học cơ cấu chấp hành là động cơ điện một chiều.
- Luật điều khiển leader-follower được nghiên cứu dựa trên mối quan hệ hình học giữa các robot. Từ chuyển động của robot leader, luật điều khiển đặt ra vận tốc cho các follower theo tốc độ của leader tương ứng và sai lệch giữa góc định hướng chuyển động để đội hình được giữ không đổi.
- Áp dụng thuật toán đồng thuận trong điều khiển leader-follower để điều khiển các robot đạt được sự đồng thuận đội hình.

Kết quả mô phỏng sẽ được nghiên cứu trong chương tiếp theo.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

## CHƯƠNG 3: MÔ PHỎNG.

### Nội dung chính:

---

3.1. Mô phỏng 1 – Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot. ....	37
3.2. Mô phỏng 2 – Vận chuyển hợp tác đội hình ba robot. ....	44
3.3. Mô phỏng 3 – Đội hình robot giám sát mục tiêu. ....	50

---

Trong chương trước mô hình chuyển động của robot cùng luật điều khiển đội hình leader-follower cho hệ robot di động đã được nghiên cứu. Trong chương này, một số mô phỏng được thực hiện nhằm kiểm tra tính đúng đắn của luật điều khiển khi phối hợp đội hình robot trong các nhiệm vụ hợp tác: vận chuyển vật và giám sát mục tiêu, tương ứng với các trường hợp mô phỏng:

- **Mô phỏng 1:** Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot.
- **Mô phỏng 2:** Vận chuyển hợp tác đội hình ba robot.
- **Mô phỏng 3:** Giám sát mục tiêu đội hình ba robot.

Giả sử các robot chuyển động không trượt (không có ma sát giữa các bánh xe và mặt phẳng chuyển động), môi trường không có vật cản và không có nhiễu tác động lên các robot. Thông số của các robot và bộ điều khiển PID sử dụng trong các mô phỏng được liệt kê trong bảng 3.1.

Bảng 3. 1. Thông số của Robot.

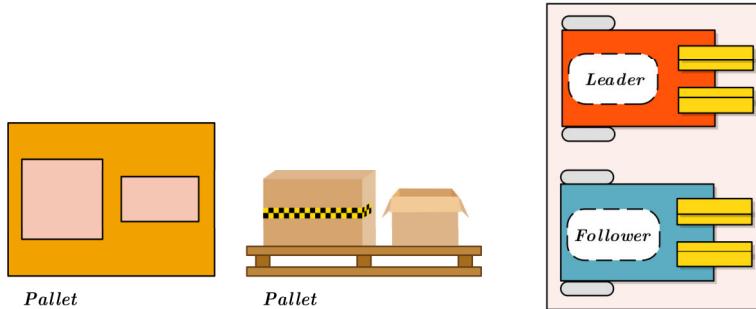
<b>Bánh xe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bán kính: <math>r = 0,0425m</math></li> <li>• Khoảng cách hai bánh: <math>l = 0,25m</math></li> </ul>
<b>Động cơ DC Motor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Điện trở phần ứng: <math>R_a = 1,35 [\Omega]</math></li> <li>• Điện cảm phần ứng: <math>L_a = 0,3 [H]</math></li> <li>• Momen quán tính: <math>J = 0,03 \cdot 10^{-3} [N.m^2.rad^{-1}]</math></li> <li>• Back-emf constant: <math>K_b = 0,0105 [V.s.rad^{-1}]</math></li> <li>• Hằng số momen: <math>K_m = 0,0105 [N.m.A^{-1}]</math></li> <li>• Hệ số ma sát nhót: <math>b = 1,15 \cdot 10^{-6} [N.m.s]</math></li> </ul>

<b>Bộ điều khiển PID</b>	<p>Mô phỏng 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Leader: <math>K_p = 28; K_i = 27; K_d = 5</math>.</li> <li>+ Follower: <math>K_p = 48; K_i = 45; K_d = 8,5</math>.</li> </ul> <p>Mô phỏng 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Leader: <math>K_p = 28; K_i = 27; K_d = 5</math>.</li> <li>+ Followers: <math>K_p = 50; K_i = 48; K_d = 12,5</math>.</li> </ul> <p>Mô phỏng 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Leader: <math>K_p = 25; K_i = 24; K_d = 5</math>.</li> <li>+ Followers: <math>K_p = 20; K_i = 16,75; K_d = 4,2</math>.</li> </ul>
...	...

### 3.1. Mô phỏng 1 – Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot.

Một trong những ứng dụng phổ biến của điều khiển đội hình là phối hợp các robot cùng vận chuyển một vật nặng. Tùy thuộc vào mục đích ứng dụng, kích thước và khối lượng của vật mà đội hình sẽ thay đổi theo phù hợp. Mục tiêu là nhóm robot mang vật, di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối sao cho đội hình luôn được giữ không đổi để vật không bị rơi trong quá trình vận chuyển.

Xét hệ hai robot vận chuyển vật gồm một leader và một follower như sau:



Vị trí ban đầu các robot tại  $t = 0$ :

- + Leader:  $(x_L^0, y_L^0, \theta_L^0) = (0, 0, 0)$ .
- + Follower:  $(x_F^0, y_F^0, \theta_F^0) = (0, -0.5, 0)$ .

Khi đó tại thời điểm ban đầu, các robot tạo thành đội hình:  $d^{ref} = 0,5m$ ;  $\phi^{ref} = \frac{\pi}{2}$ .

Robot leader di chuyển với tốc độ:

- + Vận tốc:  $v_L(t) = 0,4(m/s)$ .

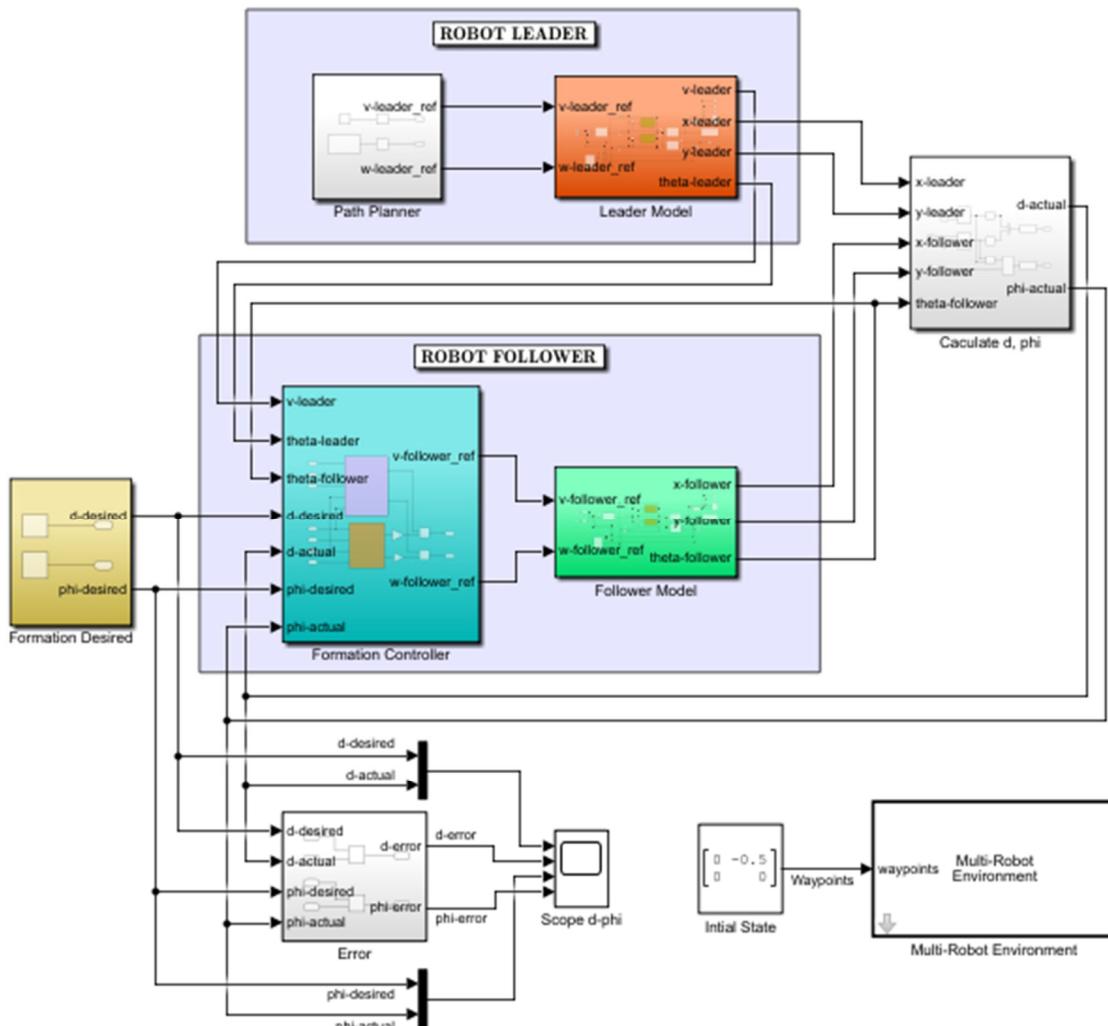
Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

$$+ \text{Vận tốc góc: } \omega_L(t) = \begin{cases} 0,25(\text{rad / s}) & 5s < t \leq 8s \\ -0,25(\text{rad / s}) & 15s < t \leq 18s \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

Đặt các giới hạn tốc độ cho robot follower:

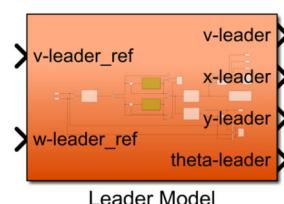
$$0 \leq v_F \leq v_{F\max} = 0,8(\text{m / s}), |\omega_F| \leq \omega_{F\max} = 0,5(\text{rad / s})$$

### ➡ So sánh mô phỏng Simulink:

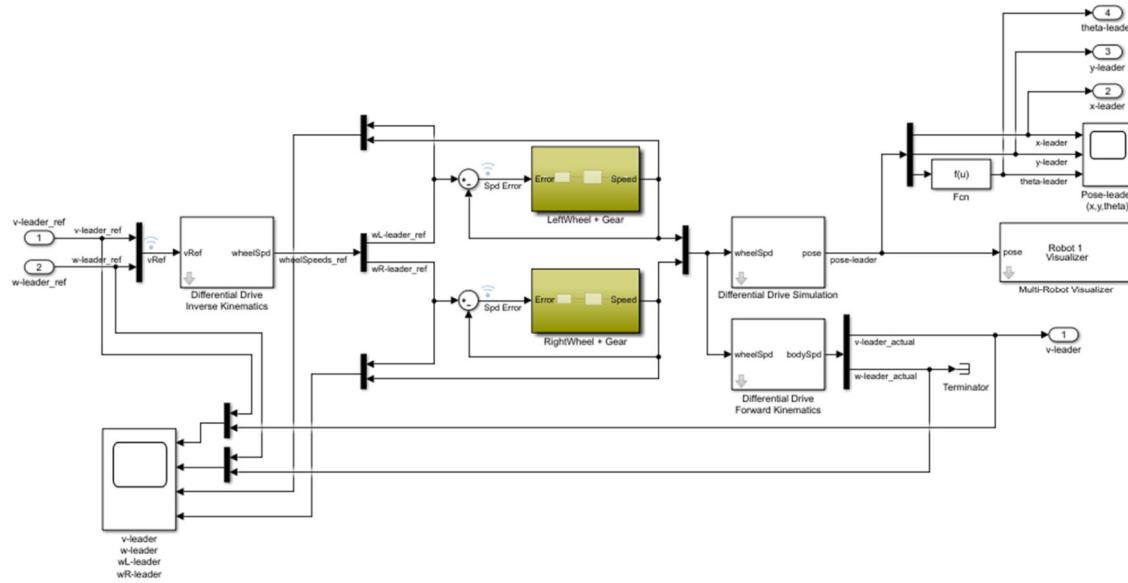


Hình 3. 1. Mô phỏng vận chuyển hợp tác đội hình hai robot.

#### ➤ Mô hình robot leader:

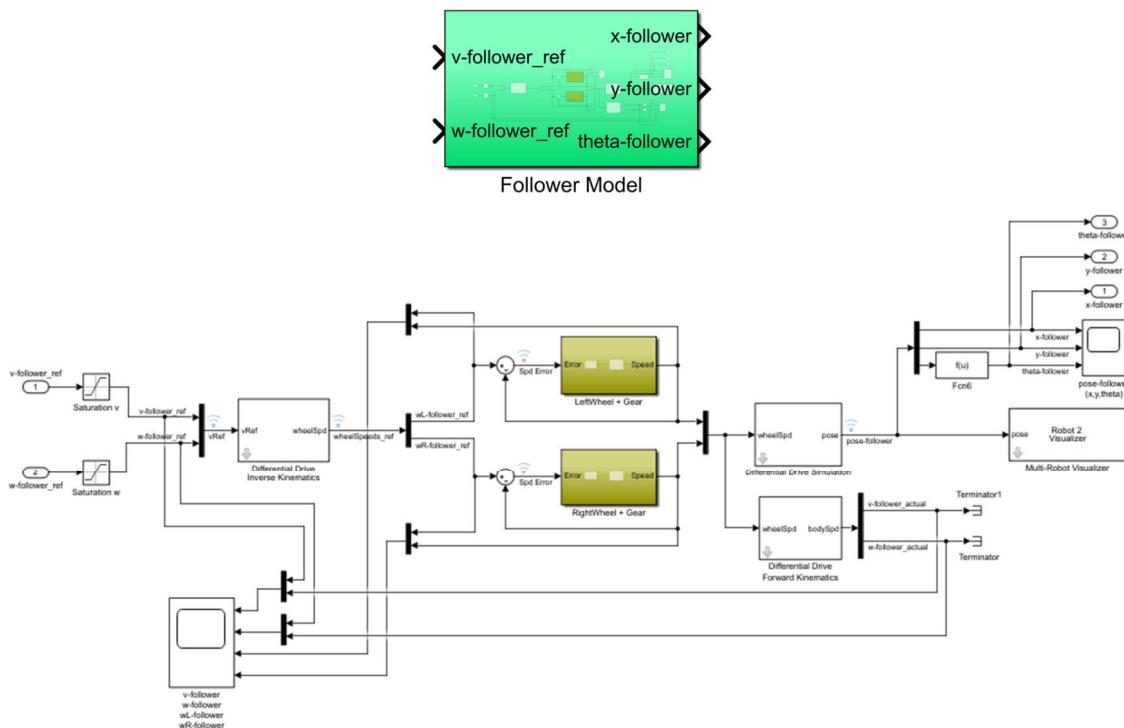


Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đối tượng”.



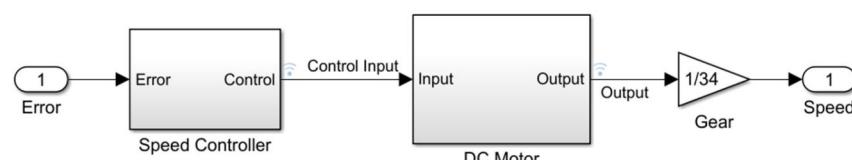
Hình 3. 2. Mô hình robot leader.

➤ **Mô hình robot follower:**

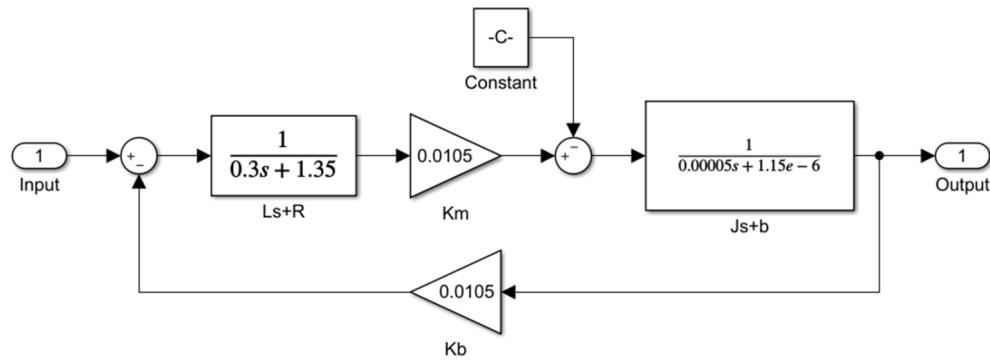


Hình 3. 3. Mô hình robot follower.

➤ **Khối động cơ DC Motor và Speed Controller:**

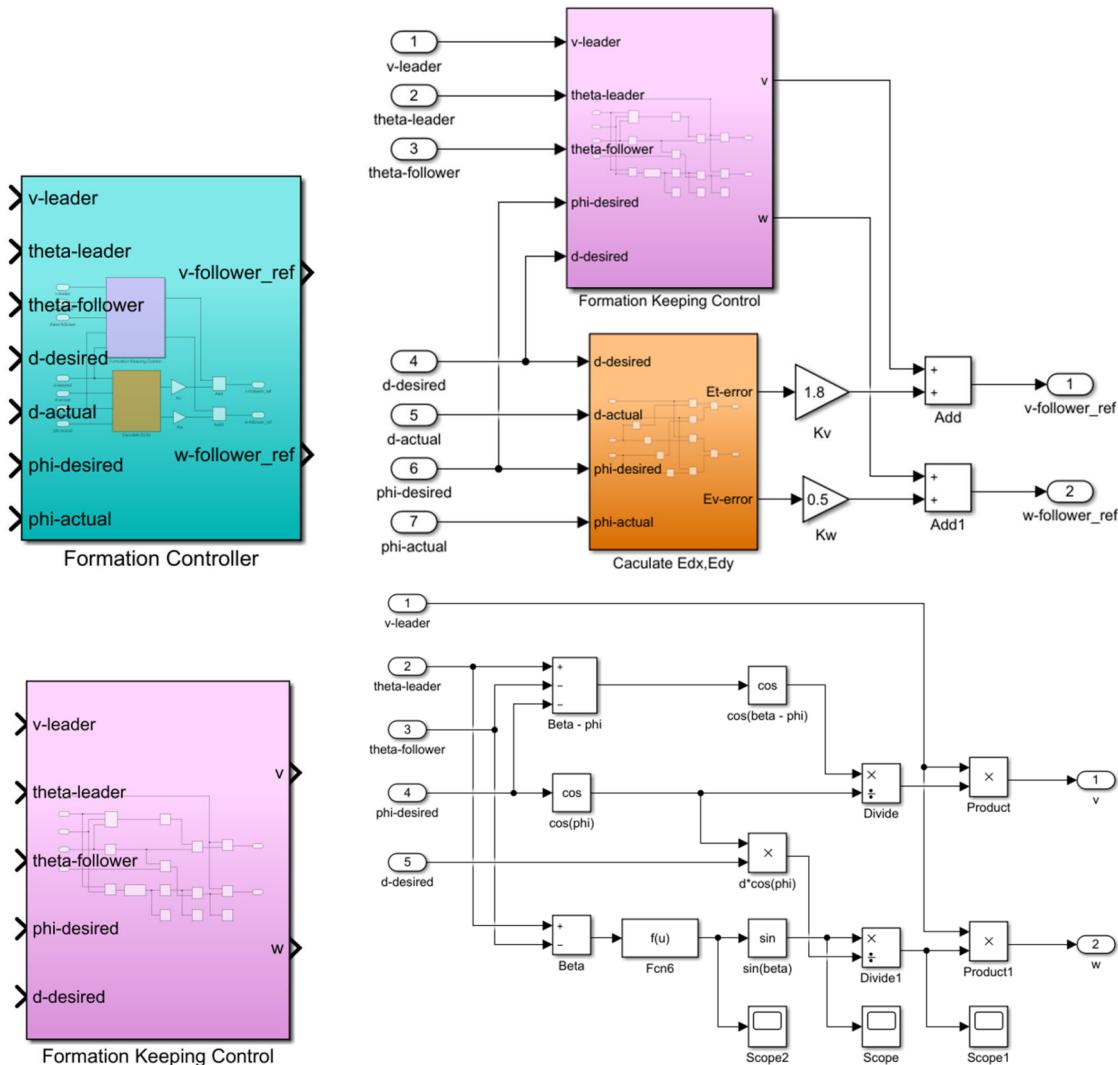


Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

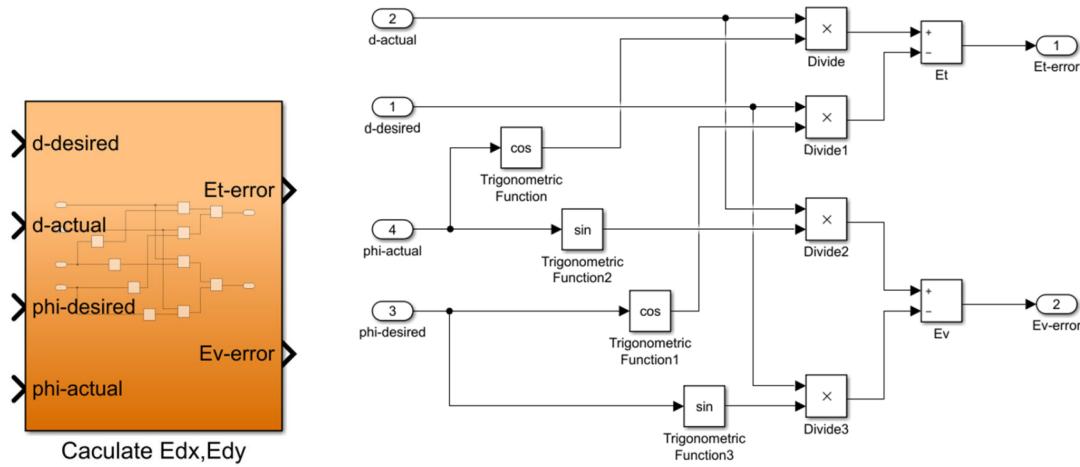


Hình 3. 4. Khởi động cơ DC Motor và Speed Controller.

➤ **Bộ điều khiển Leader-Follower Formation Controller:**

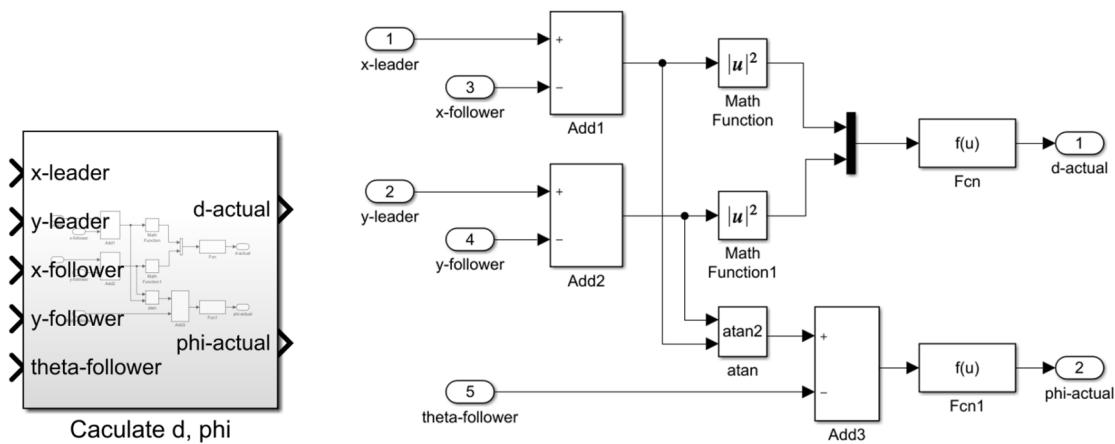


Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 3. 5. Bộ điều khiển Leader-Follower Controller.

➤ Khối tính khoảng cách  $d$  và góc lệch  $\phi$ :

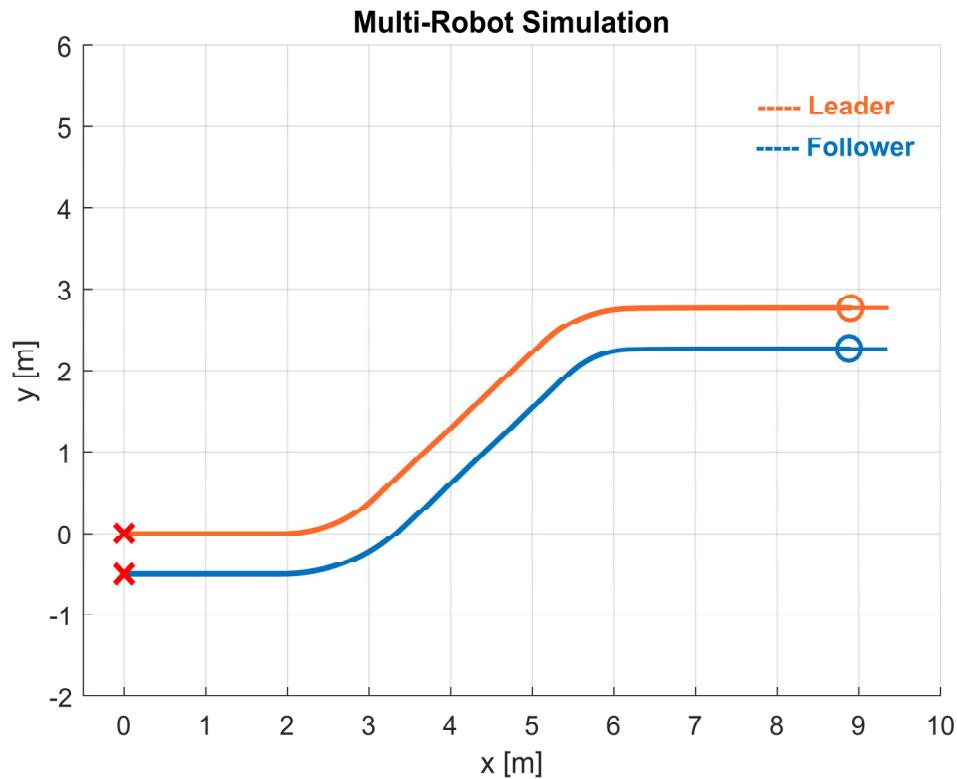


Hình 3. 6. Khối tính tính khoảng cách  $d$  và góc lệch  $\phi$ .

➡ Kết quả mô phỏng:

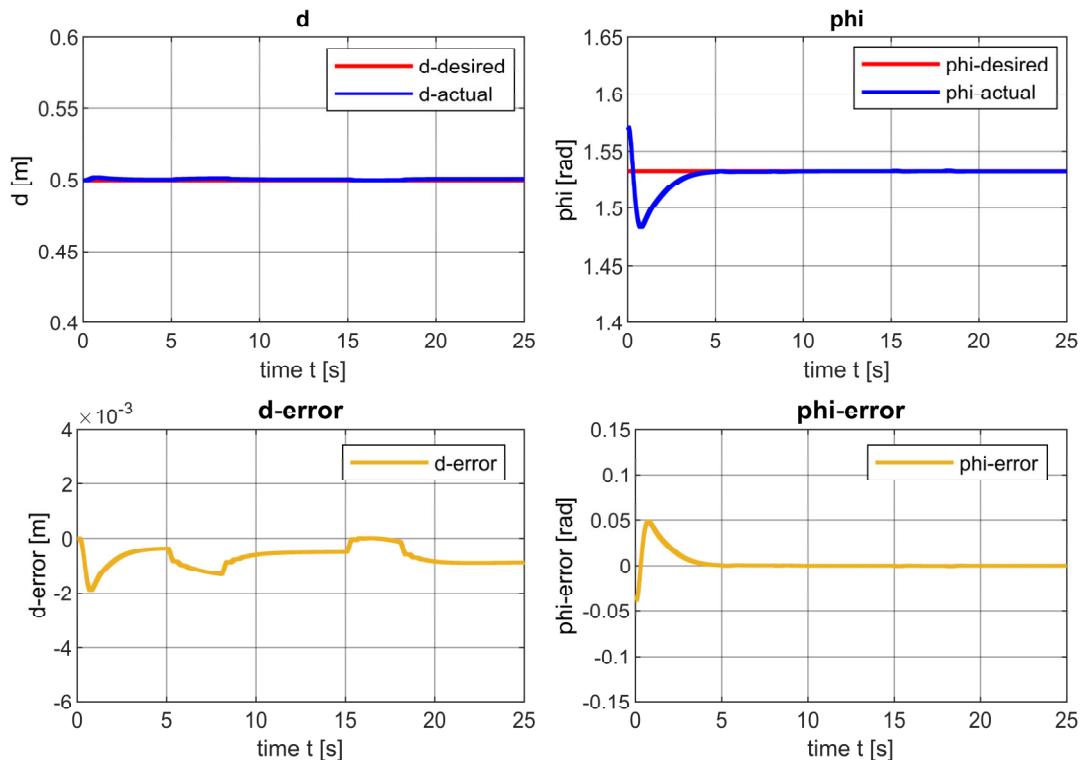
➤ Quỹ đạo của hai robot:

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 3. 7. Quỹ đạo hai robot.

➤ Khoảng cách và góc lệch giữa follower so với leader:

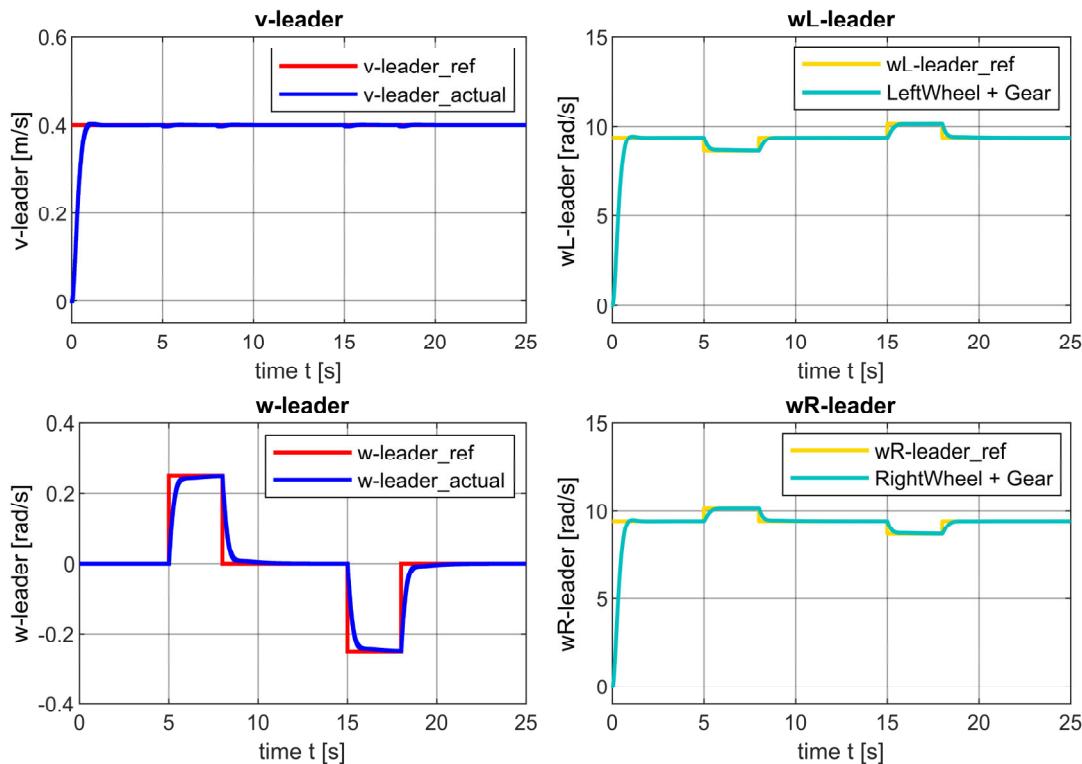


Hình 3. 8. Khoảng cách và góc lệch giữa follower so với leader.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Quỹ đạo của hai robot và khoảng cách giữa chúng theo thời gian được thể hiện trong các hình 3.7 và hình 3.8. Từ kết quả mô phỏng có thể thấy luật điều khiển cho đáp ứng tốt. Khi phối hợp hai robot cùng vận chuyển hàng, đội hình gần như không đổi so với vị trí ban đầu. Robot follower di chuyển giữ đúng vị trí tương đối với robot leader, với sai lệch khoảng cách chỉ khoảng  $2 \cdot 10^{-3} (m) \approx 2 (mm)$  là không đáng kể. Như vậy vật không bị rời trong quá trình vận chuyển.

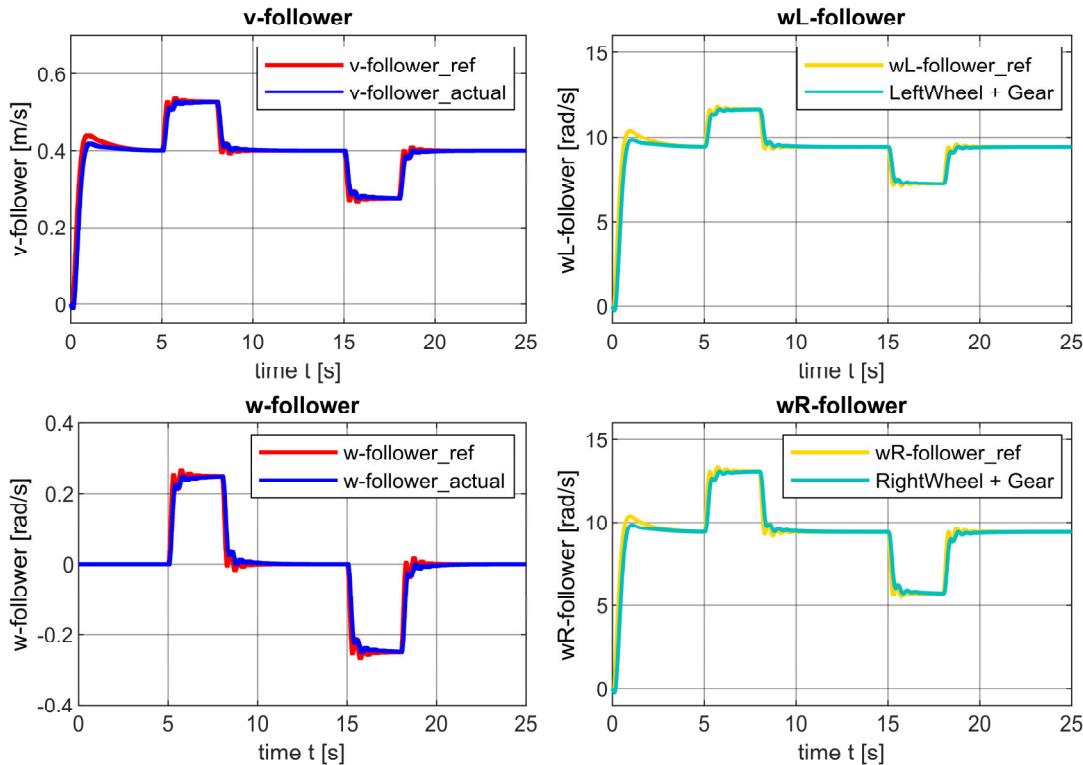
➤ **Tốc độ robot leader và hai bánh xe:**



Hình 3. 9. Tốc độ robot leader và hai bánh xe.

➤ **Tốc độ robot follower và hai bánh xe:**

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 3. 10. Tốc độ robot follower và hai bánh xe.

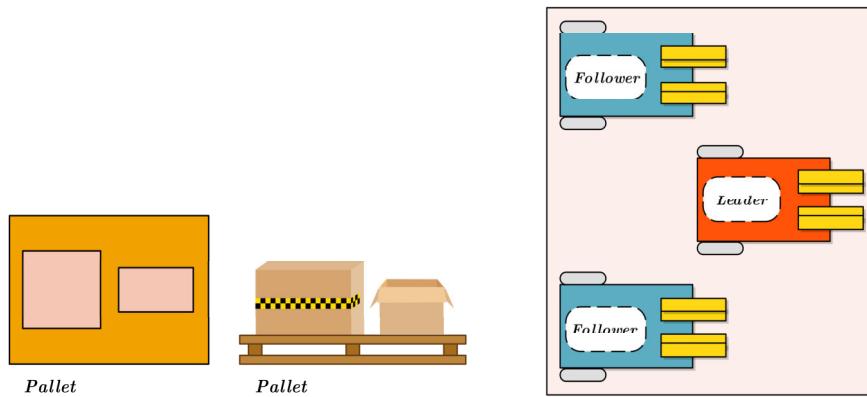
Ngoài ra, vận tốc và vận tốc góc của các robot và tốc độ tương ứng của các bánh xe lần lượt được thể hiện trong các hình 3.9 (robot leader), và hình 3.10 (robot follower). Từ kết quả mô phỏng ta thấy của bộ điều khiển PID đã thiết kế cho chất lượng điều khiển tốt, tốc độ thực tế của động cơ bám sát giá trị tham chiếu, thời gian xác lập nhanh, độ lọt vô thấp.

### 3.2. Mô phỏng 2 – Vận chuyển hợp tác đội hình ba robot.

Tùy thuộc vào mục đích ứng dụng, kích thước và khối lượng của vật, ta có thể phối hợp nhiều robot hơn, đội hình vì vậy sẽ thay đổi theo phù hợp. Trong mục này mô phỏng được mở rộng với một nhóm ba robot. Ba robot xuất phát ở vị trí ban đầu mà tại đó các robot tạo thành một đội hình tam giác. Mục tiêu là các robot mang vật, di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối và giữ đội hình không đổi để vật không bị rơi trong quá trình vận chuyển.

Xét hệ ba robot vận chuyển vật gồm một leader và hai follower như sau:

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Vị trí ban đầu của các robot ( $t = 0$ ):

- + Leader:  $(x_L^0, y_L^0, \theta_L^0) = (0, 0, 0)$ .
- + Follower1 (F1):  $(x_{F1}^0, y_{F1}^0, \theta_{F1}^0) = (-0.5, 0.5, 0)$ .
- + Follower2 (F2):  $(x_{F2}^0, y_{F2}^0, \theta_{F2}^0) = (-0.5, -0.5, 0)$ .

Khi đó tại thời điểm ban đầu các robot tạo thành đội hình:

$$d_1^{ref} = d_2^{ref} = 0,5\sqrt{2} \approx 0,7071(m); \phi_1^{ref} = -\frac{\pi}{4}, \phi_2^{ref} = \frac{\pi}{4}$$

Robot leader di chuyển với tốc độ:

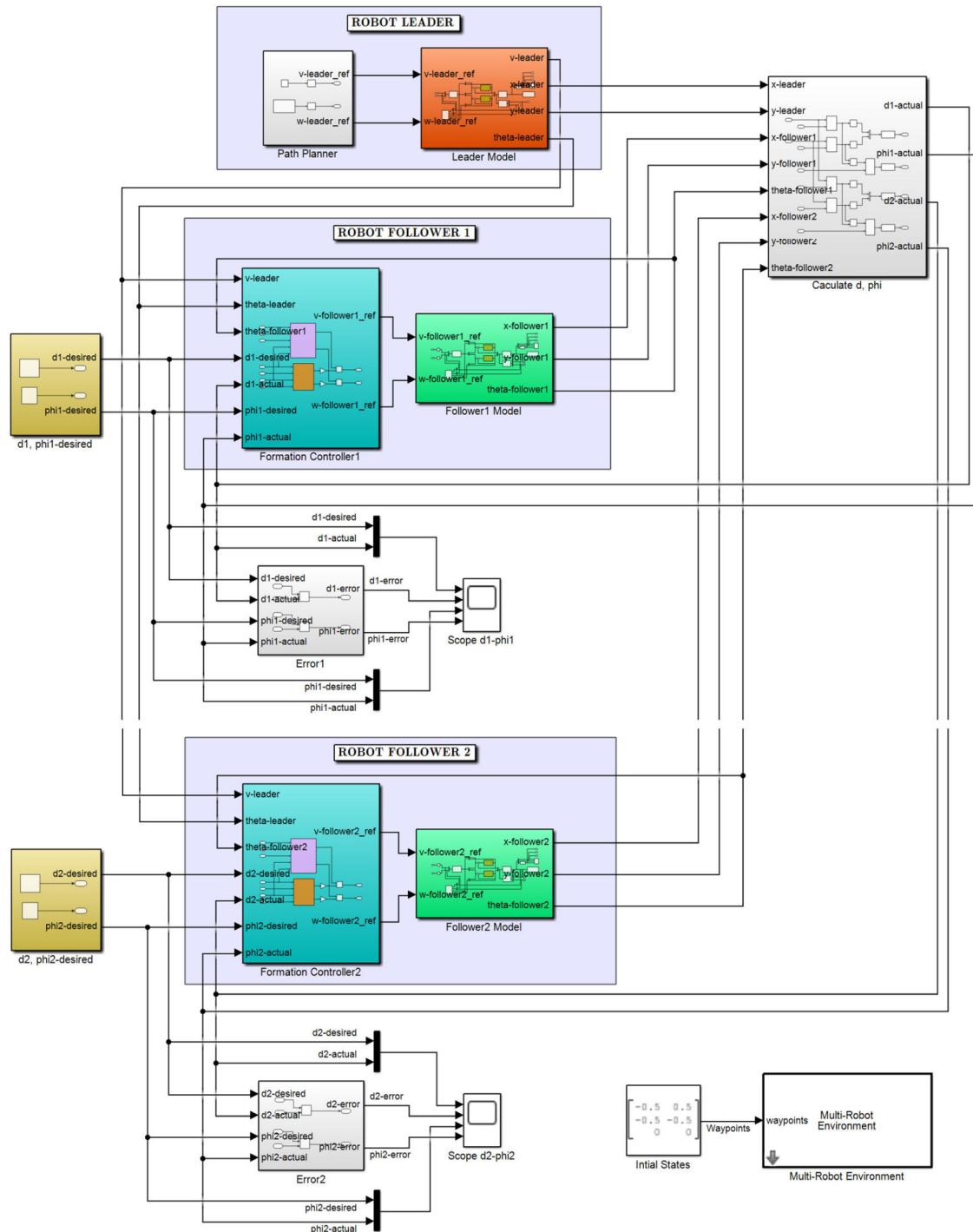
- + Vận tốc:  $v_L(t) = 0,5(m/s)$ .
- + Vận tốc góc:  $\omega_L(t) = \begin{cases} 0,25(rad/s) & 5s < t \leq 8s \\ -0,25(rad/s) & 15s < t \leq 18s \\ 0 & otherwise \end{cases}$

Đặt các giới hạn tốc độ cho robot follower:

$$0 \leq v_F \leq v_{F\max} = 0,8(m/s), |\omega_F| \leq \omega_{F\max} = 0,5(rad/s)$$

**Sơ đồ mô phỏng Simulink:**

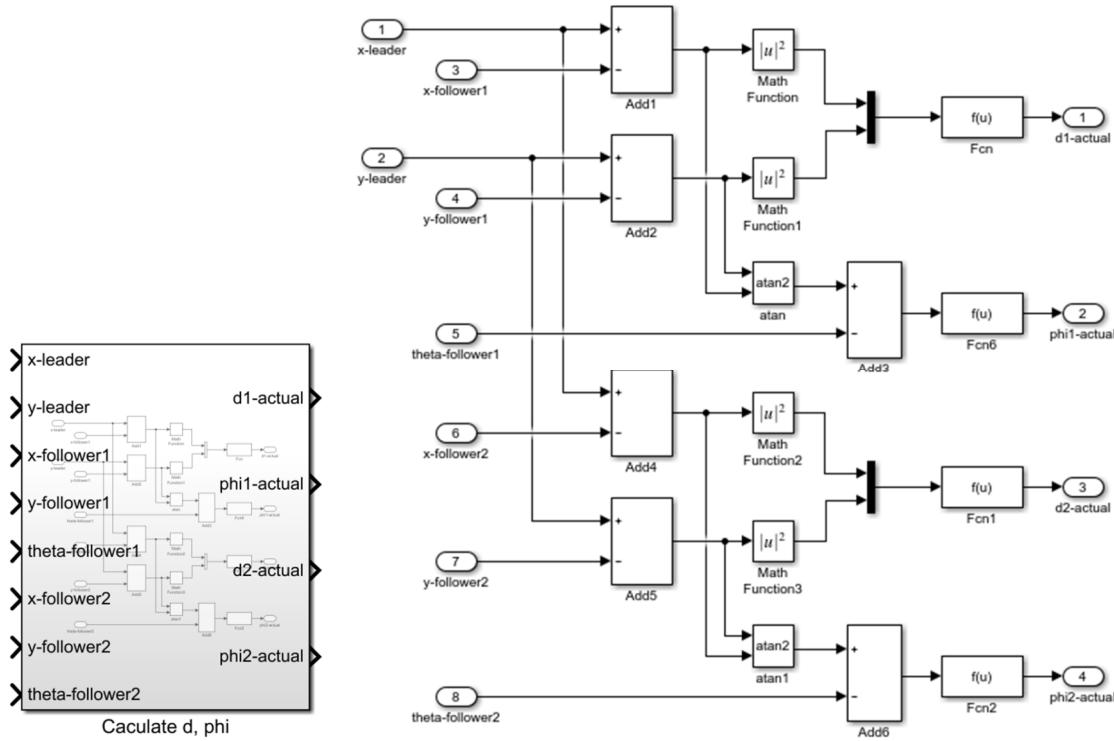
Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đối tượng”.



Hình 3. 11. Mô phỏng vận chuyển hợp tác đội hình ba robot.

**Khởi tính khoảng cách  $d_1, d_2$  và góc lệch  $\phi_1, \phi_2$ :**

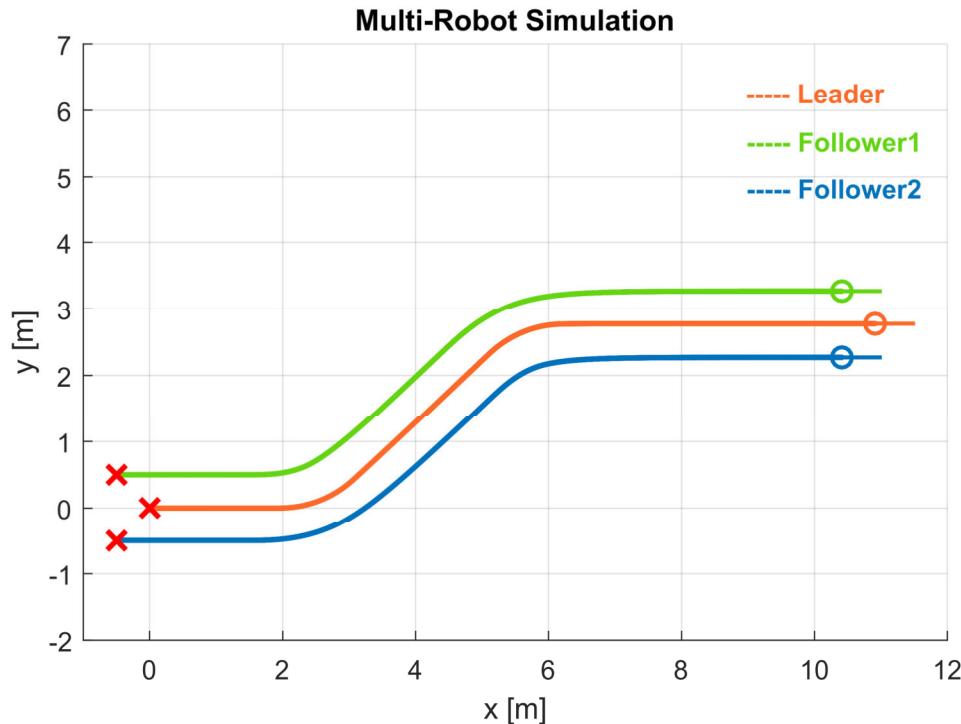
Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 3. 12. Khối tính khoảng cách  $d_1, d_2$  và góc lệch  $\phi_1, \phi_2$ .

✚ Kết quả mô phỏng:

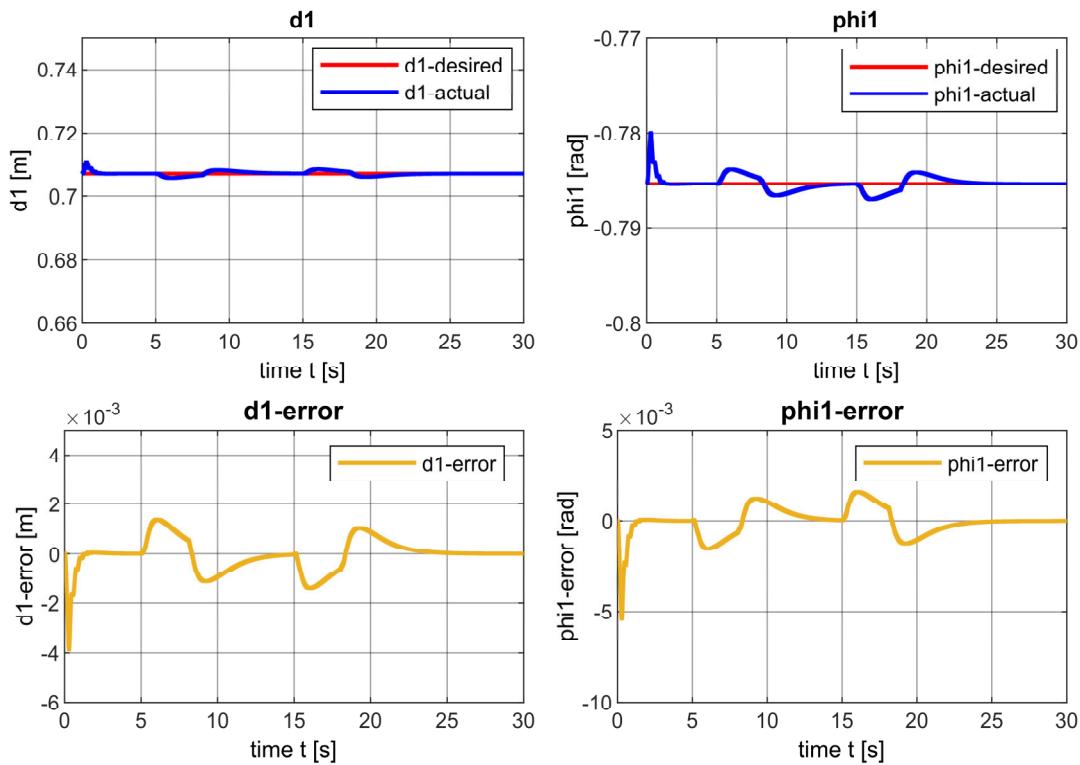
➤ Quỹ đạo các robot:



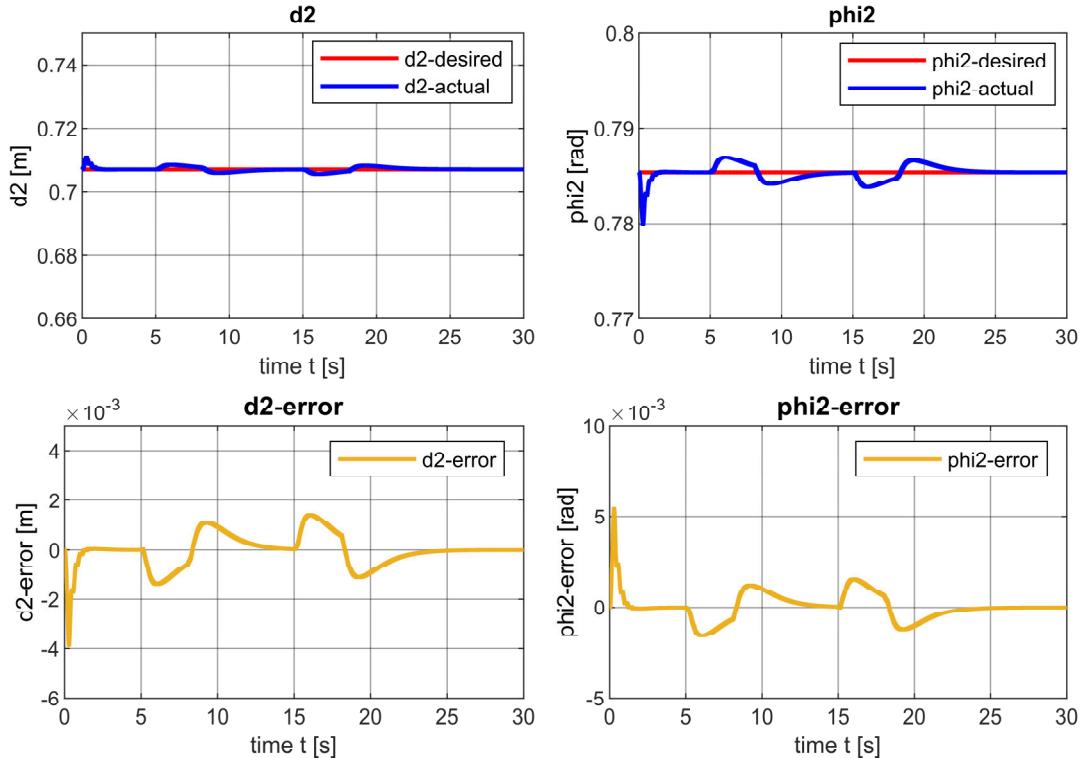
Hình 3. 13. Quỹ đạo ba robot.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

➤ **Khoảng cách và góc lệch giữa hai follower so với leader :**



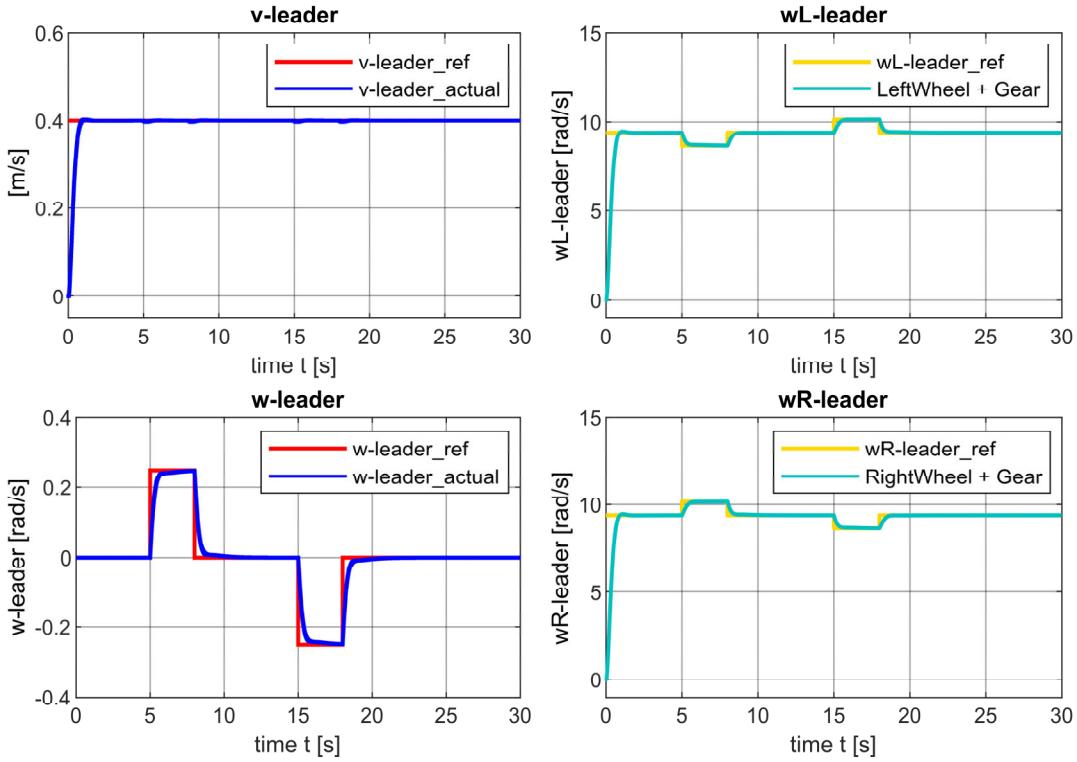
Hình 3. 14. Khoảng cách và góc lệch giữa follower1 so với leader.



Hình 3. 15. Khoảng cách và góc lệch giữa follower2 so với leader.

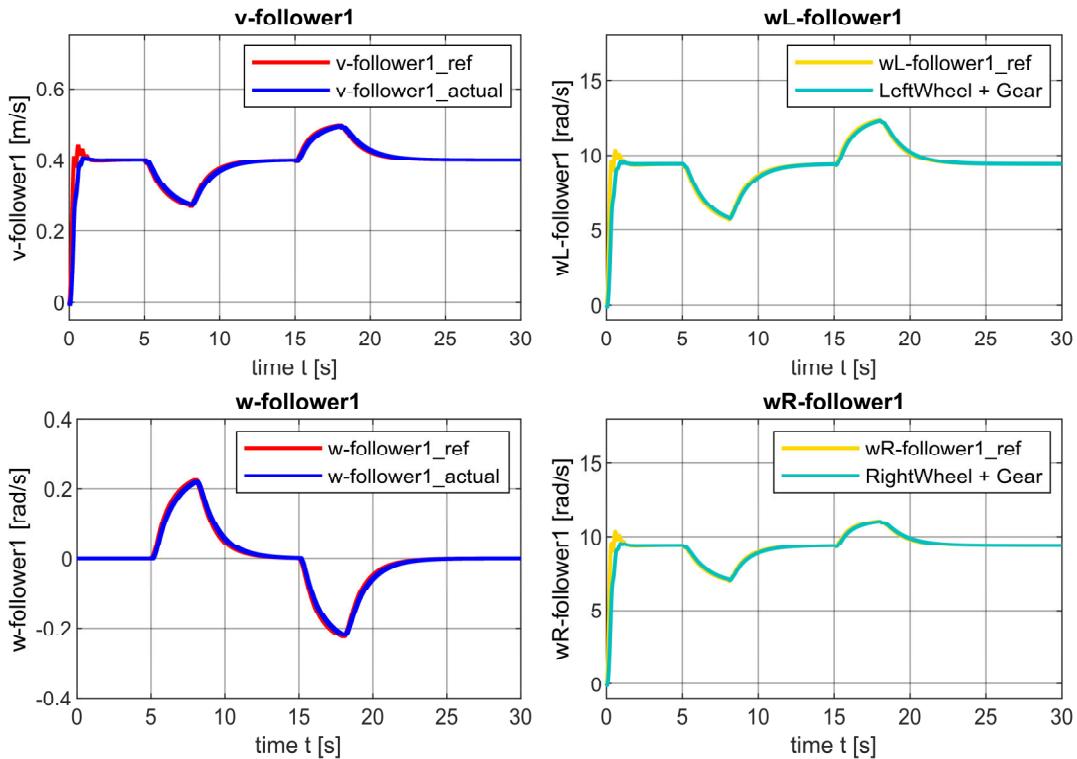
Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

➤ **Tốc độ robot leader và hai bánh xe:**



Hình 3. 16. Tốc độ robot leader và hai bánh xe.

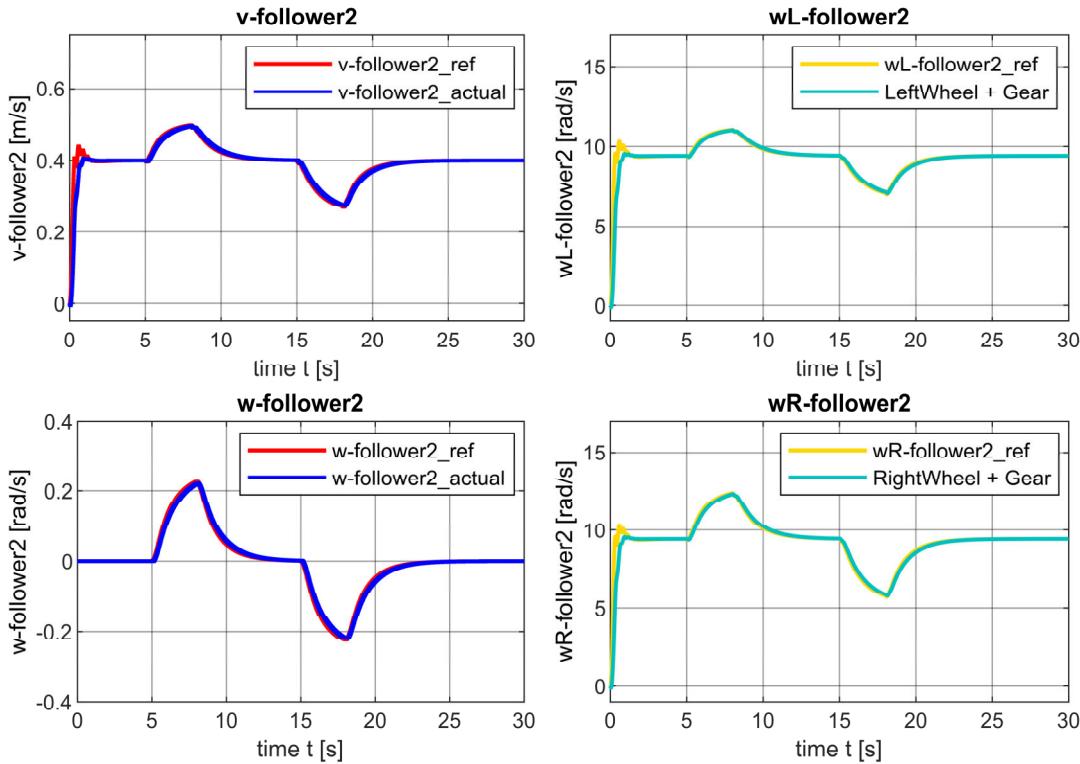
➤ **Tốc độ robot follower1 và hai bánh xe:**



Hình 3. 17. Tốc độ robot follower1 và hai bánh xe.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

➤ **Tốc độ robot follower2 và hai bánh xe:**



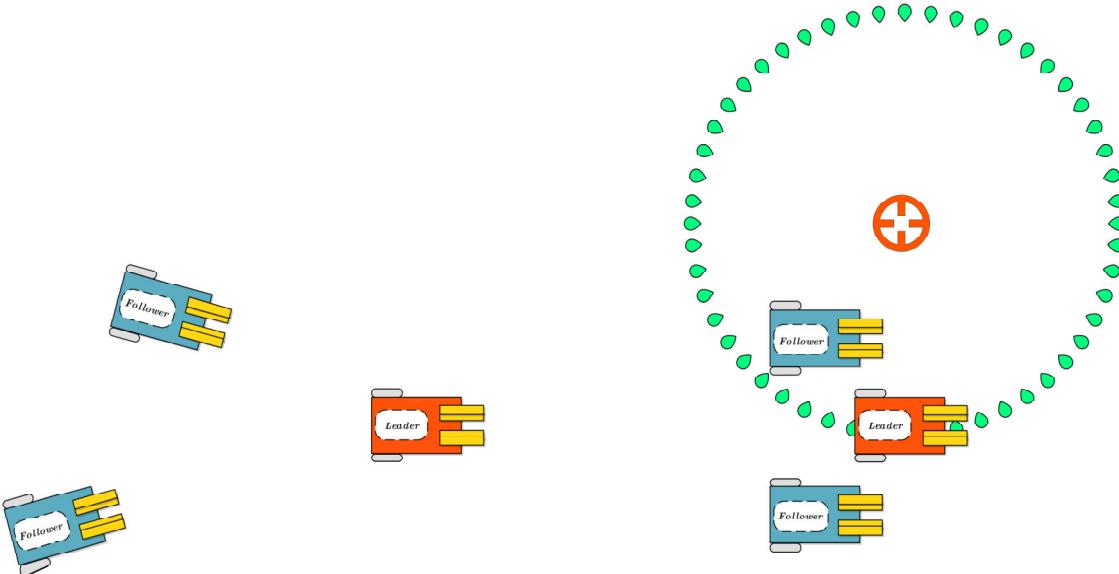
Hình 3. 18. Tốc độ robot follower2 và hai bánh xe.

Quỹ đạo của ba robot, khoảng cách và góc lệch giữa chúng theo thời gian được thể hiện trong các hình 3.13, hình 3.14 và hình 3.15. Từ kết quả mô phỏng có thể thấy luật điều khiển cho đáp ứng tốt. Khi phối hợp ba robot cùng vận chuyển hàng, đội hình gần như không đổi so với vị trí ban đầu. Các robot follower di chuyển giữ đúng vị trí tương đối với robot leader, với sai lệch khoảng cách chỉ khoảng  $4 \cdot 10^{-3} (m) \approx 4 (mm)$  là không đáng kể. Như vậy vật không bị rời trong quá trình vận chuyển.

### 3.3. Mô phỏng 3 – Đội hình robot giám sát mục tiêu.

Một ứng dụng khác của điều khiển đội hình là phối hợp một nhóm robot cùng tham gia vào nhiệm vụ giám sát mục tiêu. Tại thời điểm ban đầu, ba robot ở những địa điểm khác nhau, sau đó cùng di chuyển đến một vùng được chỉ định mà tại đó các robot thiết lập thành một đội hình và giữ đội hình không đổi trong suốt nhiệm vụ.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Vị trí ban đầu của các robot ( $t = 0$ ):

- + Leader:  $(x_L^0, y_L^0, \theta_L^0) = (0, 0, 0)$ .
- + Follower1 (F1):  $(x_{F1}^0, y_{F1}^0, \theta_{F1}^0) = (-2.5, 3, 0)$ .
- + Follower2 (F2):  $(x_{F2}^0, y_{F2}^0, \theta_{F2}^0) = (-2, -2.5, 0)$ .

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:

$$d_1^{ref} = d_2^{ref} = 1(m); \phi_1^{ref} = -\frac{\pi}{4}, \phi_2^{ref} = \frac{\pi}{4}$$

Robot leader di chuyển với tốc độ:

- + Vận tốc:  $v_L(t) = 0,5(m/s)$ .
- + Vận tốc góc:  $\omega_L(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 15s \\ 0,2(rad/s) & 15s < t \leq 55s \end{cases}$

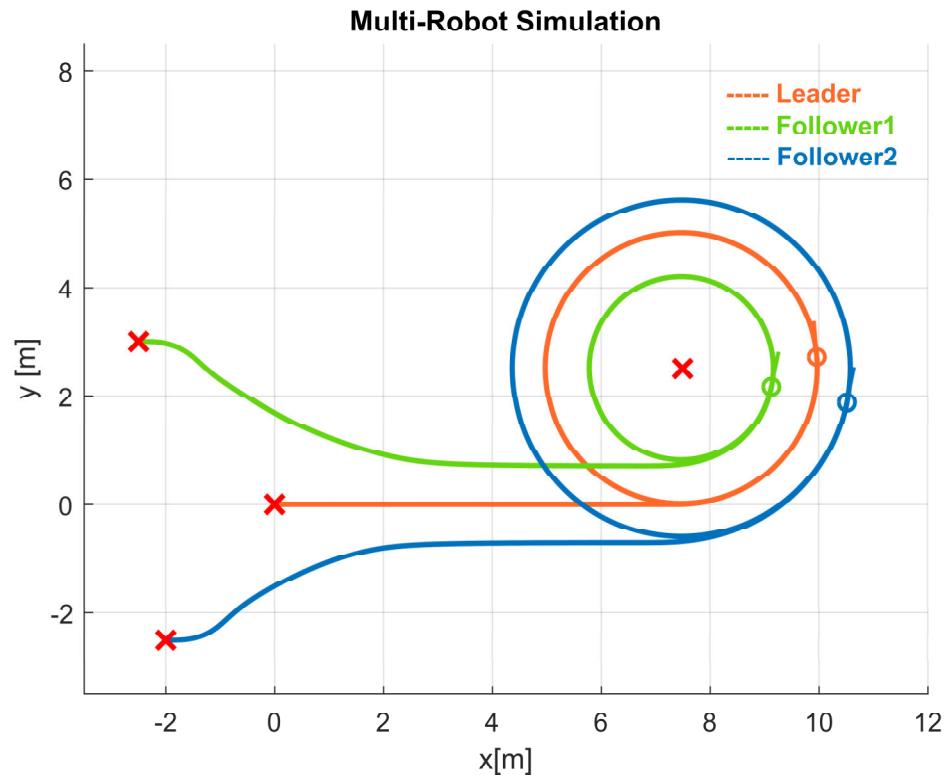
Đặt các giới hạn tốc độ cho các robot follower:

$$0 \leq v_F \leq v_{F\max} = 1(m/s), |\omega_F| \leq \omega_{F\max} = 0,8(rad/s)$$

➡ **Kết quả mô phỏng:**

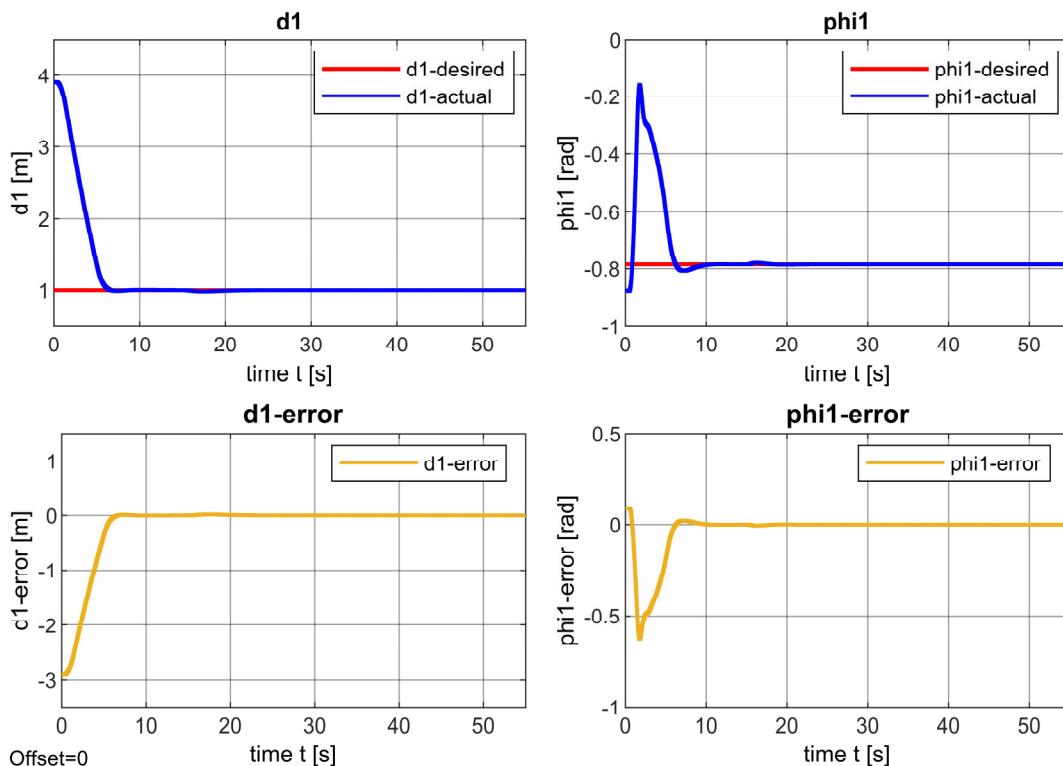
➤ **Quỹ đạo các robot:**

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



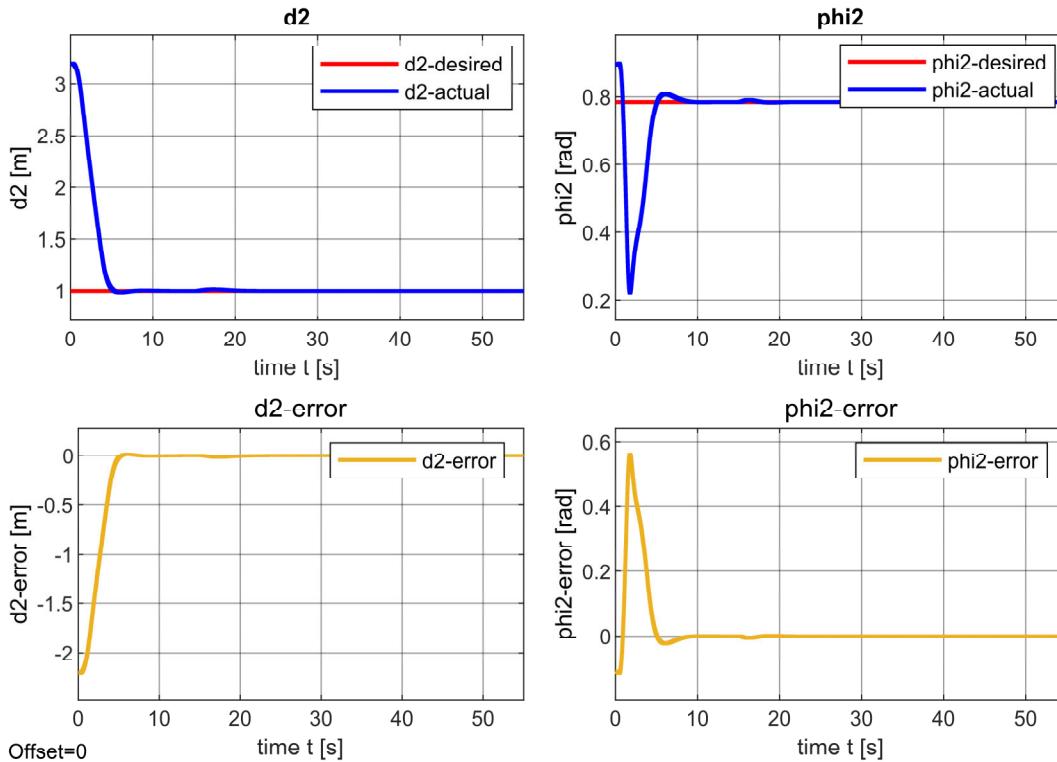
Hình 3. 19. Quỹ đạo ba robot.

➤ **Khoảng cách và góc lệch giữa hai follower so với leader:**



Hình 3. 20. Khoảng cách và góc lệch giữa follower1 so với leader.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

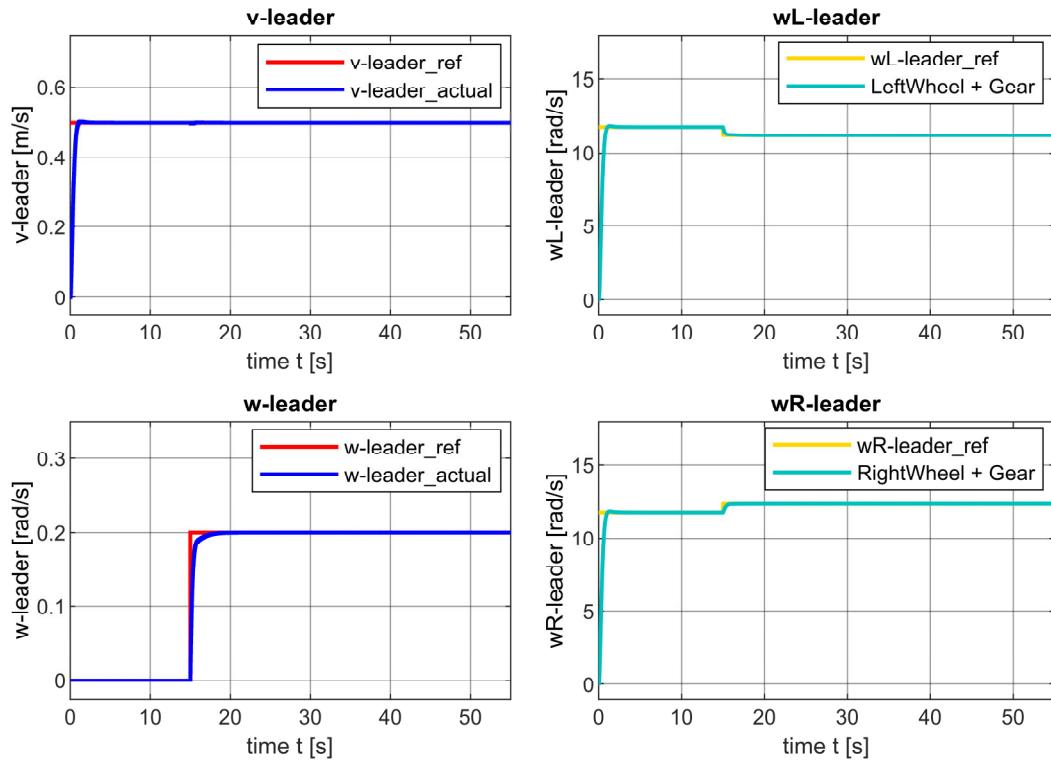


Hình 3. 21. Khoảng cách và góc lệch giữa follower2 so với leader.

Từ kết quả mô phỏng có thể thấy, xuất phát từ các vị trí ban đầu khác nhau, các robot follower di chuyển sát nhập với robot leader tạo thành đội hình với các khoảng cách và góc lệch như yêu cầu đặt ra (hình 3.19) và giữ đội hình không đổi theo thời gian. Hình 3.20 và hình 3.21 thể hiện đáp ứng của hệ, sau một khoảng thời gian  $t \approx 10s$ , sai lệch khoảng cách giữa các follower so với leader bằng 0, hệ đạt được sự đồng thuận đội hình. Ngoài ra, vận tốc và vận tốc góc của các robot cùng tốc độ tương ứng của các bánh xe được thể hiện trong các hình 3.22, hình 3.23 và hình 3.24.

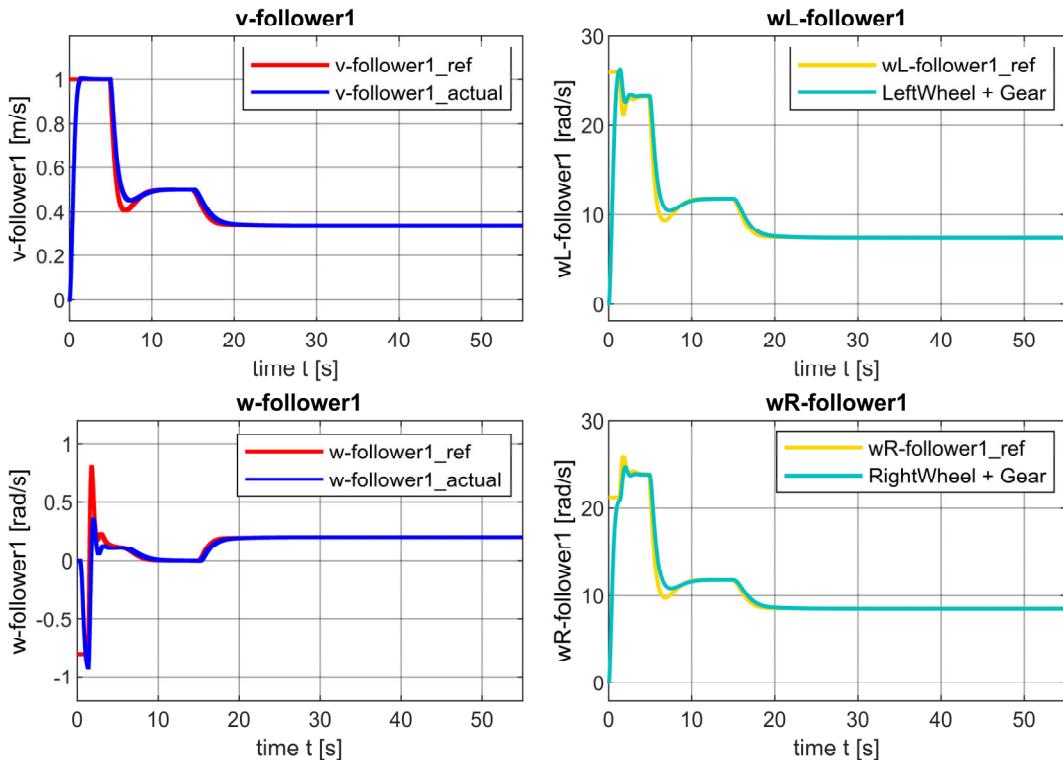
➤ **Tốc độ robot leader và hai bánh xe:**

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 3. 22. Tốc độ robot leader và hai bánh xe.

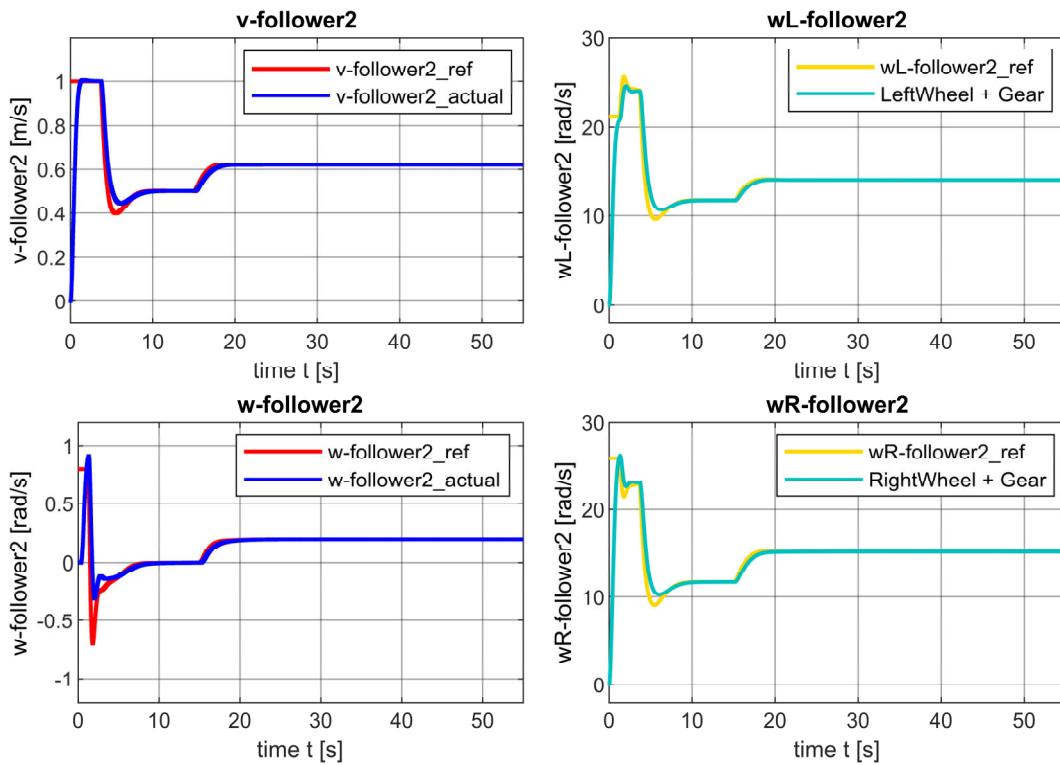
➤ **Tốc độ robot follower1 và hai bánh xe:**



Hình 3. 23. Tốc độ robot follower1 và hai bánh xe.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

➤ **Tốc độ robot follower2 và hai bánh xe:**



Hình 3. 24. Tốc độ robot follower2 và hai bánh xe.

## CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM.

### Nội dung chính:

---

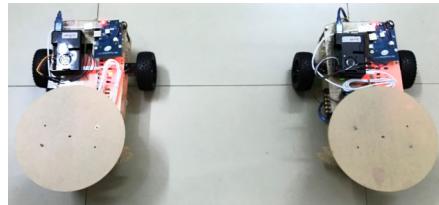
4.1. Kết cấu vật lý của robot. ....	56
4.1.1. Máy tính nhúng Raspberry Pi 3 Model B+. ....	57
4.1.2. Arduino Uno R3. ....	58
4.1.3. Động cơ DC Servo.....	59
4.1.4. Motor Shield VNH2SP30.....	60
4.2. Phần mềm và lập trình. ....	60
4.3. Kết nối truyền thông. ....	61
4.3.1. Truyền thông Raspberry Pi – Arduino. ....	61
4.3.2. Truyền thông Raspberry Pi – Raspberry Pi. ....	62
4.4. Thực nghiệm. ....	63
4.4.1. Thực nghiệm 1 – Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot. ....	63
4.4.2. Thực nghiệm 2 – Xác lập đội hình hai robot.....	65

---

### 4.1. Kết cấu vật lý của robot.

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 nối có chiều dài  $l = 25\text{cm}$ . Mỗi bánh xe được truyền động bởi động cơ một chiều DC motor 12V, được trang bị hộp số có tỉ số truyền  $1 : 34$ , tốc độ sau hộp số đạt tối đa  $280\text{ (rpm)} \approx 29,32\text{ (rad / s)}$  và encoder quang có độ phân giải 374 xung hỗ trợ trong điều khiển tốc độ động cơ. Đơn vị xử lý trung tâm của robot là máy tính nhúng Raspberry Pi 3B+ và board điều khiển Arduino Uno R3 thực hiện các tính toán và những yêu cầu phức tạp khác như truyền thông, gửi nhận dữ liệu giữa các robot.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 4. 1. Mô hình thí nghiệm hai robot di động.

Cấu trúc phần cứng trong mỗi robot như sau:

- Raspberry Pi 3B+.
- Arduino Uno R3.
- Động cơ DC giảm tốc GA25 V1.
- Motor Shield VNH2SP30.
- Nguồn.
- Khung robot, bánh xe.

#### 4.1.1. Máy tính nhúng Raspberry Pi 3 Model B+.

Yêu cầu của lớp điều khiển cấp cao là tính toán và gửi các giá trị tốc độ đến lớp điều khiển cấp thấp, đồng thời phải kết nối truyền thông để giao tiếp, gửi nhận dữ liệu giữa các robot. Đây là những kỹ thuật phức tạp đòi hỏi phải có bộ xử lý trung tâm với cấu hình mạnh và phần cứng thích hợp. Vì vậy nhóm lựa chọn máy tính nhúng Raspberry Pi 3 Model B+ làm thiết bị điều khiển cấp cao.



Hình 4. 2. Máy tính nhúng Raspberry Pi 3 Model B+.

Raspberry Pi 3 Model B+ là một board mạch đơn (máy tính nhúng) có kích thước nhỏ bằng một thẻ tín dụng. Raspberry Pi 3B+ là bản nâng cấp của Raspberry Pi 3B đã từng ra mắt trước đây. Điểm nâng cấp chính của Raspberry Pi 3B+ là dùng vi xử lý Broadcom BCM2837B0 với 4 nhân 1.4GHz (cao hơn so với BCM2837 1.2GHz trên Raspberry Pi 3B), chạy trên hệ điều hành chính là Raspbian Linux. Ngoài ra còn một số hệ điều hành khác được hỗ trợ như: Windows 10 IoT Core, Ubuntu MATE,...

Với yêu cầu giao tiếp truyền thông giữa các robot đòi hỏi tốc độ mạng nhanh, Raspberry Pi 3B+ có thể đáp ứng với kết nối Wi-Fi hai băng tần 2.4GHz và 5GHz (Dual Band), Ethernet Gigabit (qua cổng USB 2.0) tốc độ lên đến 300Mbps. Ngoài ra thiết bị

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

cũng hỗ trợ Bluetooth 4.2 và Bluetooth LE giúp kết nối mạng tốt hơn với các thiết bị thông minh khác.

#### **Thông số kỹ thuật chính của board Raspberry Pi 3B+:**

- SoC: Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC 1,4 GHz
- RAM: 1 GB LPDDR2 SDRAM
- 2.4GHz, 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2
- Gigabit Ethernet USB 2.0 (Maximum 300 Mbps)
- 40-pin GPIO
- HDMI
- 4 cổng USB 2.0
- Khe cắm thẻ nhớ MicroSD
- Nguồn cấp: 5V/2.5A DC power input

#### **4.1.2. Arduino Uno R3.**

Arduino Uno R3 là một board mạch vi điều khiển nguồn mở dựa trên vi điều khiển Microchip ATmega328P được phát triển bởi Arduino.cc. Board mạch được trang bị các chân đầu vào, đầu ra số và tương tự, hỗ trợ ghép nối với các board mạch mở rộng khác, phục vụ các ứng dụng điều khiển. Nhóm sử dụng Arduino Uno R3 làm thiết bị điều khiển cấp thấp. Arduino thực thi bộ điều khiển PID số và gửi tín hiệu điều khiển dưới dạng xung PWM đến driver điều khiển tốc độ động cơ bám theo các giá trị tốc độ tham chiếu được gửi đến từ lớp điều khiển cấp cao Raspberry Pi 3B+.



Hình 4. 3. Board Arduino Uno R3.

#### **Thông số kỹ thuật board Arduino Uno R3:**

- Vi điều khiển: ATmega328P
- Điện áp hoạt động: 5VDC (cấp qua cổng USB)
- Tần số hoạt động: 16 MHz
- Dòng tiêu thụ: 30mA
- Điện áp vào khuyên dùng: 7 – 12VDC

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- Điện áp vào giới hạn: 6 – 20VDC
- Số chân Digital I/O: 14 (6 chân PWM)
- Số chân Analog: 6 (độ phân giải 10 bit)
- Dòng tối đa trên mỗi chân I/O: 30 mA
- Dòng ra tối đa (5V): 500 mA
- Dòng ra tối đa (3.3V): 50 mA
- Bộ nhớ flash: 32 KB (ATmega328) với 0.5KB dùng bởi bootloader
- SRAM: 2 KB (ATmega328P)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328P)

#### 4.1.3. Động cơ DC Servo.

Động cơ được sử dụng là động cơ điện một chiều có hộp số GA25 V1. Động cơ DC Servo giảm tốc GA25 V1 là động cơ được sử dụng phổ biến trong các ứng dụng robot có yêu cầu điều khiển tốc độ chính xác. Ngoài ra, động cơ được gắn thêm Encoder để có thể hồi tiếp (feedback), đo và gửi xung về vi điều khiển, từ đó vi điều khiển thực thi PID, tác động lại thông qua mạch công suất (driver) để điều khiển tốc độ hay vị trí động cơ.



Hình 4. 4. Động cơ DC Geared Motor GA25 V1.

##### ➡ **Thông số động cơ DC Geared Motor GA25 V1:**

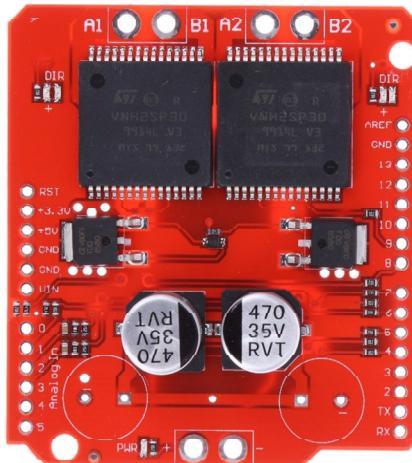
- Điện áp cấp cho động cơ hoạt động : 3 – 12VDC
- Điện áp cấp cho Encoder hoạt động: 3,3VDC
- Đĩa Encoder 11 xung, hai kênh A – B.
- Tỷ số truyền hộp giảm tốc: 1:34
- Số xung khi qua hộp giảm tốc: 374 xung.
- Đường kính động cơ: 25mm.
- Đường kính trục : 4mm
- Tốc độ không tải : 320 rpm
- Dòng không tải : 80mA
- Tốc độ có tải : 284 rpm
- Dòng khi có tải : 600mA

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- Mômen : 1,88 kgf.cm
- Công suất định mức : 13,2W
- Dòng khi động cơ bị giữ : 2,29A
- Mô men khi bị giữ : 7,96 kgf.cm

#### 4.1.4. Motor Shield VNH2SP30.

Motor Shield VNH2SP30 là một driver điều khiển động cơ với hai mạch cầu H, sử dụng cặp IC VNH2SP30 có thể điều khiển cùng lúc hai động cơ với khả năng chịu dòng tải cao lên đến 30A.



Hình 4. 5. Motor Shield VNH2SP30.

#### ✚ Thông số kỹ thuật của Motor Shield VNH2SP30:

- Dải điện áp: 5,5 – 16VDC
- Dòng tối đa: 30A
- Dòng liên tục: 14A
- Trở kháng nội MOSFET: 19mΩ (mỗi chân)
- Tần số PWM tối đa: 20kHz
- Có chân current sensor (có thể kết nối với chân analog để đo dòng)
- Bảo vệ quá dòng và quá áp

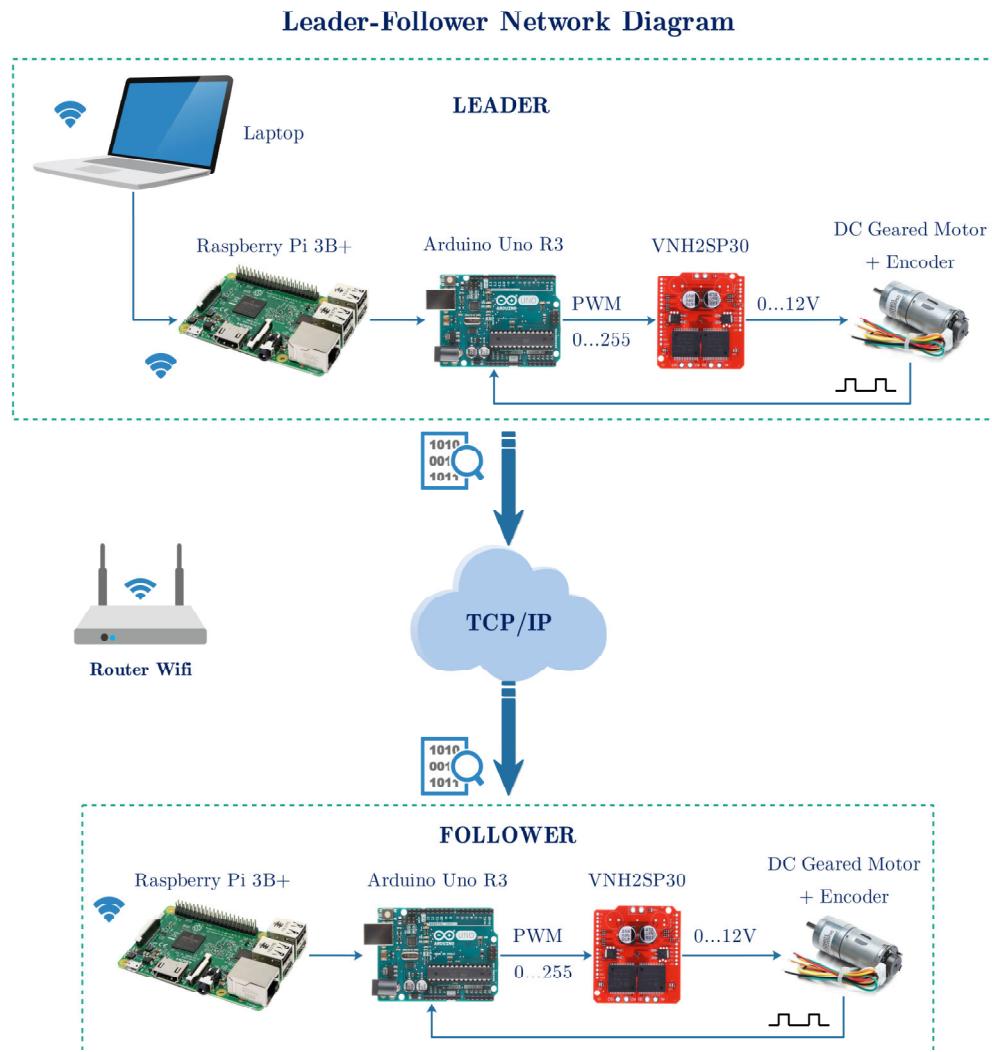
#### 4.2. Phần mềm và lập trình.

Như đã giới thiệu, cấu trúc điều khiển ở mỗi robot chia thành hai lớp: lớp điều khiển cấp cao (hight-level control layer) và lớp điều khiển cấp thấp (low-level control layer). Lớp điều khiển cấp cao là Raspberry Pi 3B+ được lập trình trên ngôn ngữ Python và chạy với thời gian lấy mẫu  $T_s = 5ms$ , đặt ra các vận tốc mong muốn cho robot thông qua tốc độ tham chiếu của hai bánh xe (phép biến đổi 5.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

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

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 giữ đúng với các 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 kết nối mạng giữa các robot như sau:



Hình 4. 6. Kết nối mạng giữa các robot.

#### 4.3. Kết nối truyền thông.

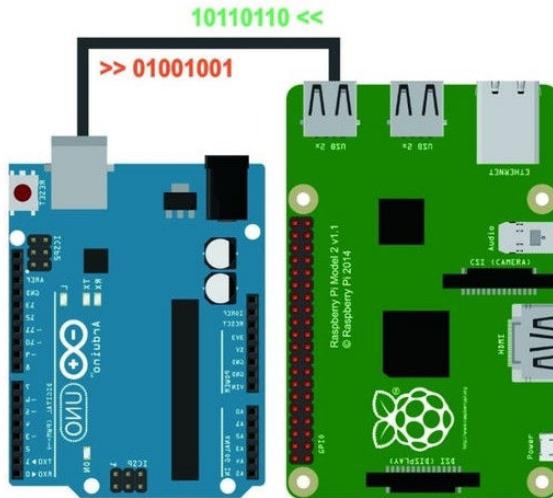
##### 4.3.1. Truyền thông Raspberry Pi – Arduino.

Giao tiếp truyền thông giữa Raspberry Pi 3B+ và Arduino Uno R3 được thiết lập thông qua giao thức truyền thông nối tiếp (Serial communications).

Truyền thông nối tiếp là giao thức thiết yếu trên mọi vi điều khiển hiện nay để kết nối, truyền nhận thông tin giữa vi điều khiển và các thiết bị khác. Các chuẩn truyền

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

thông bao gồm RS-232, RS-422 và RS-485 được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực yêu cầu kết nối dữ liệu chứng minh cho sự hiệu quả của truyền thông nối tiếp hiện nay. Tùy vào mục đích sử dụng, ta lựa chọn chuẩn truyền thông cho phù hợp. Ở đây, giữa Raspberry Pi và Arduino ta sử dụng chuẩn RS-232 và thiết lập giao tiếp qua cáp USB.



Hình 4. 7. Truyền thông Raspberry Pi – Arduino.

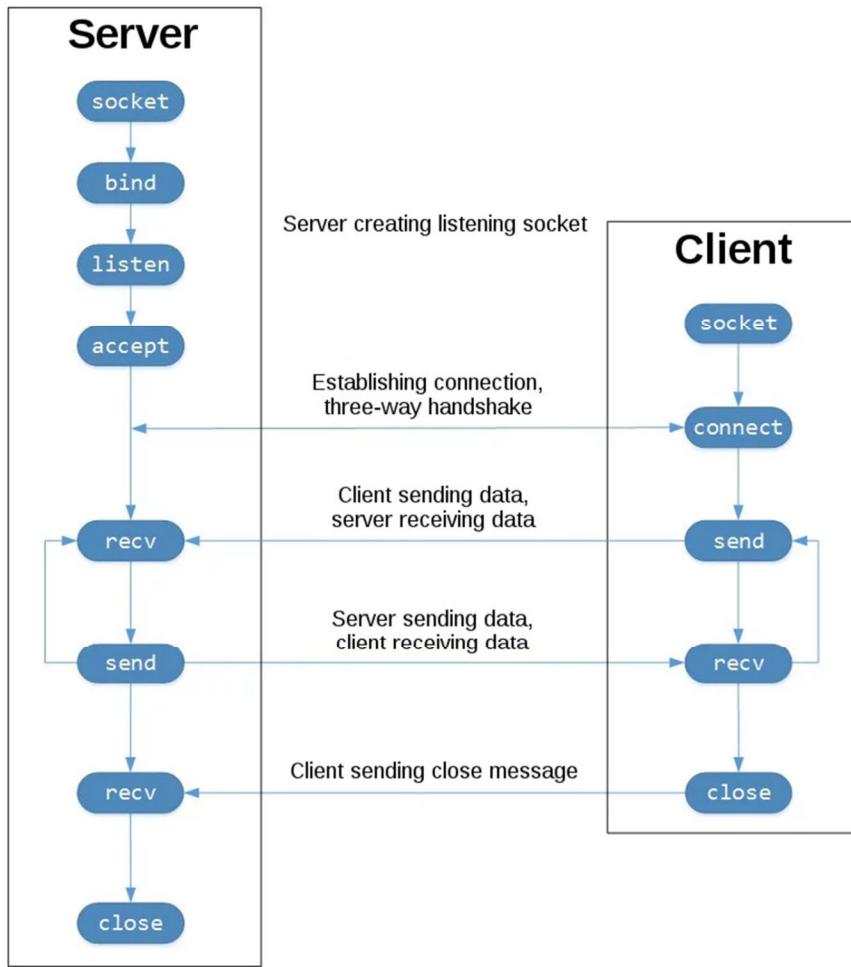
#### 4.3.2. Truyền thông Raspberry Pi – Raspberry Pi.

Lớp điều khiển cấp cao ở mỗi robot là Raspberry Pi có hỗ trợ giao thức truyền thông TCP/IP, kết nối với nhau thông qua mạng wifi nên ta chọn giao thức TCP/IP để gửi nhận dữ liệu giữa các robot leader và follower.

Mô hình TCP/IP là mô hình giao tiếp phổ biến trong truyền nhận thông tin. Mô hình gồm 2 phía, phía Client và phía Server. Client có chức năng thực hiện một tác vụ chuyên biệt nào đó, có thể truyền thông tin và nhận lệnh từ phía Server. Server nhận thông tin từ Client và gửi thông tin điều khiển.

Phía Client sẽ luôn chủ động tạo kết nối tới Server, còn bên phía Server sẽ ở trong chế độ chờ Client kết nối tới. Client trong một lúc chỉ có thể kết nối tới duy nhất một Server nhưng ngược lại Server có thể đồng thời giao tiếp với nhiều Client. Trong mô hình leader-follower mà ta sẽ xây dựng thì robot leader chính là một Server. Thuật toán kết nối Client và Server như sau:

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.



Hình 4. 8. Mô hình Client – Server.

➤ **Các bước được thực hiện với Client :**

- Bước 1: Tạo socket để kết nối qua hàm socket().
- Bước 2: Kết nối tới server nhờ hàm connect(). Hàm này thông thường sẽ block cho tới khi nào kết nối được.
- Bước 3: Gửi và nhận thông tin qua hàm send/recv.

➤ **Các bước được thực hiện với Server :**

- Bước 1: Tạo socket để kết nối qua hàm socket()
- Bước 2: Gắn socket vừa tạo với địa chỉ của server. Dùng hàm bind().
- Bước 3: Thiết lập socket để chờ kết nối. Dùng hàm listen().
- Bước 4: Chấp nhận kết nối từ client. Hàm accept() thông thường sẽ bị block tới khi nào có kết nối tới.

Bước 5: Gửi và nhận thông tin qua hàm send()/recv().

#### 4.4. Thực nghiệm.

##### 4.4.1. Thực nghiệm 1 – Vận chuyển hợp tác đội hình hai robot.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

### a. Mô tả thí nghiệm.

Trong thí nghiệm này, hai robot cùng mang một vật có dạng khối hộp, di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối mà không làm rơi vật. Xét hai trường hợp mang vật: hai robot di chuyển nối tiếp và hai robot di chuyển song song. Vị trí ban đầu của các robot:

- Hai robot di chuyển nối tiếp:

$$\text{Leader: } \left( x_L^0, y_L^0, \theta_L^0 \right)^T = \left( 0, 0, 0 \right)^T, \text{ follower: } \left( x_F^0, y_F^0, \theta_F^0 \right)^T = \left( -0.5, 0, 0 \right)^T.$$

- Hai robot di chuyển song song:

$$\text{Leader: } \left( x_L^0, y_L^0, \theta_L^0 \right)^T = \left( 0, 0, 0 \right)^T, \text{ follower: } \left( x_F^0, y_F^0, \theta_F^0 \right)^T = \left( 0, -0.5, 0 \right)^T.$$

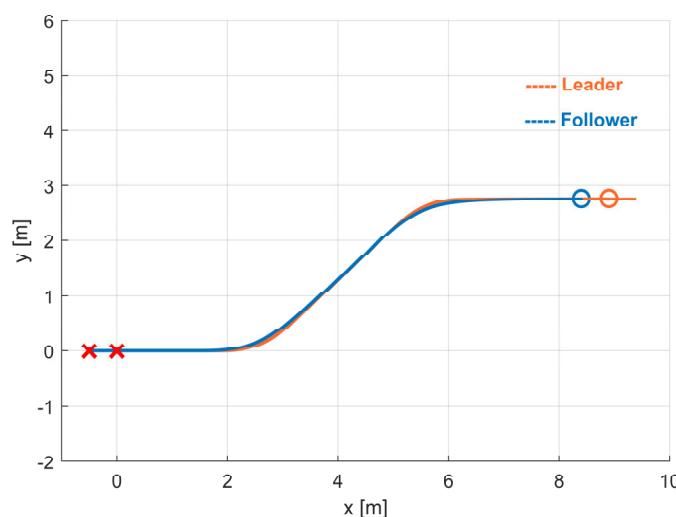
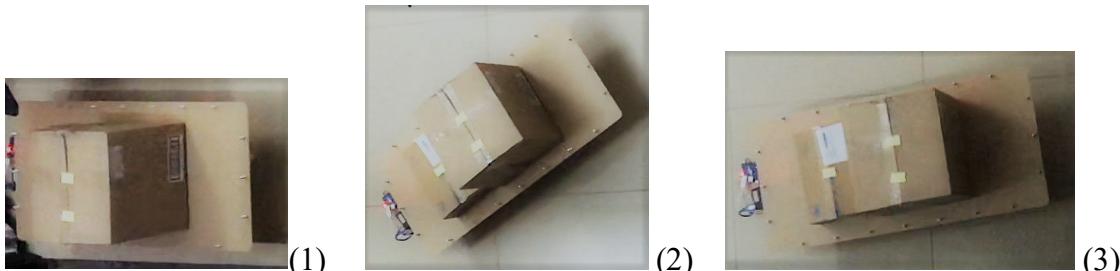
- Robot leader di chuyển với tốc độ:

+ Vận tốc:  $v_L(t) = 0,4(m/s)$ .

+ Vận tốc góc:  $\omega_L(t) = \begin{cases} 0,25(rad/s) & 5s < t \leq 8s \\ -0,25(rad/s) & 15s < t \leq 18s \\ 0 & otherwise \end{cases}$

### b. Kết quả thực nghiệm.

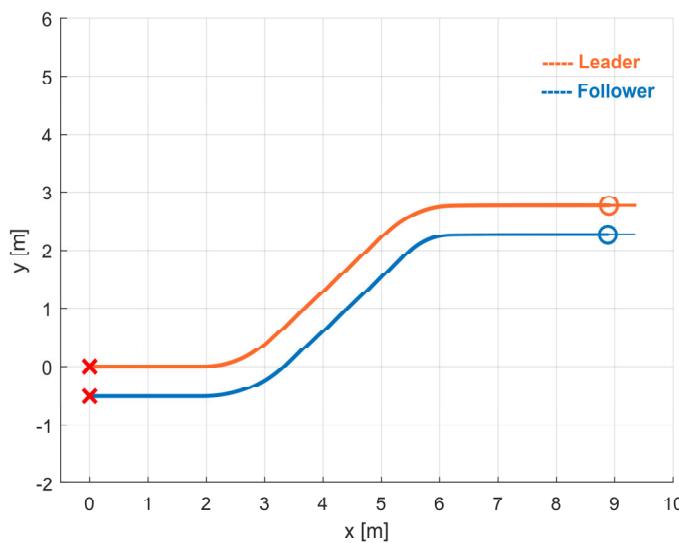
- Hai robot mang vật di chuyển nối tiếp:



Hình 4. 9. Thực nghiệm hai robot vận chuyển vật (di chuyển nối tiếp).

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- Hai robot mang vật di chuyển song song:



Hình 4. 10. Thực nghiệm hai robot vận chuyển vật (di chuyển song song).

Hình 4.9 và hình 4.10 thể hiện kết quả thực nghiệm khi phối hợp đội hình hai robot trong ứng dụng vận chuyển vật.

#### 4.4.2. Thực nghiệm 2 – Xác lập đội hình hai robot.

##### a. Mô tả thí nghiệm.

Trong thí nghiệm này, tại thời điểm ban đầu, hai robot xuất phát ở những vị trí khác nhau. Robot leader di chuyển tự do, follower sẽ di chuyển bám theo leader tạo thành một đội hình với khoảng cách và góc lệch theo yêu cầu. Vị trí ban đầu của các robot như sau:

- Leader:  $\left(x_L^0, y_L^0, \theta_L^0\right)^T = \left(0, 0, 0\right)^T$ .
- Follower:  $\left(x_F^0, y_F^0, \theta_F^0\right)^T = \left(-0.6, -1.2, 0\right)^T$ .

Khi đó, tại thời điểm ban đầu, khoảng cách và góc lệch giữa hai robot là:

$$d^0 = \sqrt{\left(0 - (-0.6)\right)^2 + \left(0 - (-1.2)\right)^2} = \frac{3\sqrt{5}}{5} \approx 1,34164 [m]$$

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

$$\phi^0 = \arctan \left( \frac{0 - (-1, 2)}{0 - (-0, 6)} \right) \approx 1,1071 [rad].$$

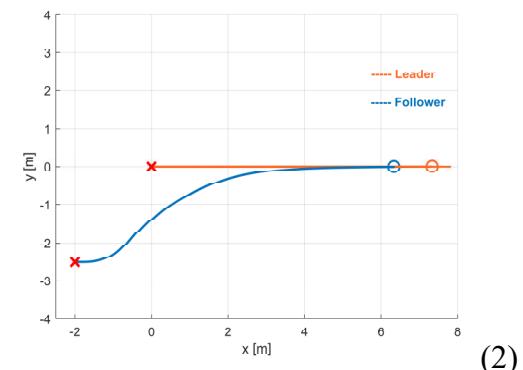
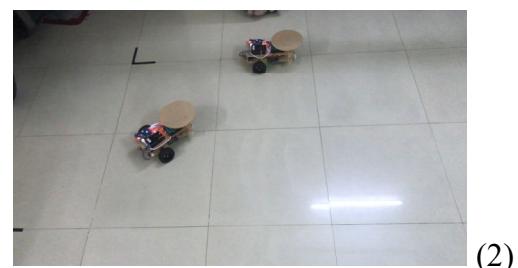
➢ Robot leader di chuyển với tốc độ:

+ Vận tốc:  $v_L(t) = 0,4(m/s)$ .

+ Vận tốc góc:  $\omega_L(t) = 0$

Khoảng cách và góc lệch tham chiếu giữa hai robot:  $d^{ref} = 0,6[m]$ ,  $\phi^{ref} = 0[rad]$ .

### b. Kết quả thí nghiệm.



Hình 4.11. Thí nghiệm xác lập đội hình hai robot.

Hình 4.11 thể hiện kết quả thực nghiệm xác lập đội hình hai robot.

Mặc dù tồn tại độ trễ trong kết nối truyền thông và gửi nhận dữ liệu giữa Raspberry Pi ở các robot cũng như độ trễ trong truyền thông Raspberry Pi – Arduino, tuy nhiên có thể thấy trong các thí nghiệm, hai robot vẫn giữ vững đội hình với các khoảng cách và góc lệch như mong muốn. Sai lệch khoảng cách và góc lệch là không đáng kể. Ngoài ra, bộ điều khiển PID ở các robot cho chất lượng điều khiển tốt, tốc độ thực tế các robot bám sát tốc độ tham chiếu.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

## KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

### Kết luận:

Sau thời gian nghiên cứu, dưới sự hướng dẫn tận tình của TS. Trần Thị Minh Dung, nhóm đã hoàn thành đồ án đúng yêu cầu và khôi lượng kiến thức theo quy định. Những kết quả đã đạt được qua 4 chương của đề tài:

Chương 1 đã tìm hiểu về thực tiễn và tiềm năng điều khiển hợp tác trong hệ thống đa đội tượng, tập trung nghiên cứu cho hệ robot di động. Nhờ phạm vi ứng dụng rộng rãi, điều khiển đội hình đã và đang trở thành hướng nghiên cứu thu hút nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực điều khiển hợp tác.

Trong chương 2, mô hình toán học và điều khiển chuyển động mỗi robot độc lập đã được nghiên cứu gồm mô hình động học và động lực học cơ cấu chấp hành, sử dụng PID điều khiển tốc độ động cơ. Thuật toán đồng thuận được nghiên cứu dựa trên cơ sở lý thuyết đồ thị, trong đó sự trao đổi thông tin giữa các phần tử trong hệ được mô hình hóa bằng một đồ thị. Nghĩa là, luật điều khiển áp dụng cho các phần tử được phân tán, mỗi phần tử tiếp nhận thông tin từ phần tử lân cận. Từ đó, ứng dụng sự đồng thuận trong việc xây dựng thuật toán điều khiển leader – follower theo đồ thị spanning-tree. Robot follower nhận dữ liệu được gửi đến từ robot leader, từ sai lệch vị trí và góc định hướng, luật điều khiển đặt ra vận tốc cho follower tương ứng với vận tốc của leader để đội hình được giữ không đổi theo thời gian.

Trong chương 3, một số mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink nhằm kiểm tra tính hiệu quả của luật điều khiển được nghiên cứu trong chương 2, ứng dụng đội hình robot di động phục vụ trong các ứng dụng hợp tác như phối hợp đội hình robot trong giám sát mục tiêu và vận chuyển vật. Các kết quả mô phỏng cho thấy luật điều khiển đã xây dựng cho chất lượng tốt. Trong mô phỏng phối hợp robot vận chuyển vật, các robot mang vật, di chuyển từ điểm đầu đến điểm cuối và đội hình robot được giữ không đổi so với vị trí ban đầu, với các sai lệch khoảng cách rất nhỏ. Trong mô phỏng đội hình robot thực hiện nhiệm vụ giám sát mục tiêu, tại thời điểm ban đầu, các robot xuất phát ở những địa điểm khác nhau, robot leader di chuyển với quỹ đạo với vận tốc định trước, từ sai lệch vị trí và góc định hướng so với leader, luật điều khiển đặt ra vận tốc tương ứng cho follower để các robot tạo thành đội hình theo dạng hình học với khoảng cách và góc lệch tham chiếu và giữ đội hình không đổi theo thời gian. Khi đó sai lệch vị trí giữa các robot bằng 0, hệ đạt được sự đồng thuận đội hình.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Từ kết quả mô phỏng trong chương 3, một số thí nghiệm hợp tác được triển khai trên mô hình hai robot di động. Thuật toán được lập trình trên ngôn ngữ Python với bộ xử lý trung tâm ở mỗi robot là Raspberry Pi, thực hiện các tính toán phức tạp và xử lý truyền thông, gửi nhận dữ liệu giữa hai robot thông qua kết nối wifi. Trong thí nghiệm hợp tác vận chuyển vật, kết quả thí nghiệm cho thấy robot follower luôn di chuyển bám theo leader với các khoảng cách và góc lệch không đổi, vật không vị rời trong quá trình vận chuyển. Trong thí nghiệm giám sát mục tiêu, hai robot xuất phát ở các vị trí khác nhau, robot leader di chuyển với vận tốc định trước, follower di chuyển theo với vận tốc tương ứng và đạt được sự đồng thuận về khoảng cách và góc lệch sau một khoảng thời gian ngắn. Sau đó đội hình được giữ không đổi theo thời gian.

#### **Mở rộng đề tài và hướng nghiên cứu tiếp theo:**

Một số những thách thức và vấn đề mở rộng nghiên cứu của đề tài:

1. Trong thực tế, nhiều là vấn đề cần phải được loại bỏ, do vậy hướng nghiên cứu trong tương lai có thể áp dụng các phương pháp điều khiển nâng cao để cải thiện chất lượng điều khiển như điều khiển thích nghi với nhiều, điều khiển dự báo để các follower có thể di chuyển bám theo leader với các khoảng cách và góc lệch tham chiếu mà không cần thiết phải biết chính xác vận tốc cũng như vị trí của robot leader, dựa trên một số nghiên cứu mới hơn như [48, 50, 51].
2. Bên cạnh đó, trong nhiều ứng dụng thực tiễn, điều khiển đội hình robot di chuyển trong môi trường vật lý phức tạp yêu cầu robot có thể tránh vật cản cũng như đảm bảo tránh sự va chạm giữa các robot. Trong tương lai, chúng tôi sẽ xem xét vấn đề điều khiển đội hình cùng với việc tránh chướng ngại vật cũng như chủ động tránh va chạm giữa các robot dựa trên một số nghiên cứu gần đây như [62, 63] và [64, 65].

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. S. Shamma, "Dimensions of cooperative control," in *Cooperative Control of Distributed Multi-Agent Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 3-5.
- [2] Y. Cao, S. Fukunga, A. Kahng, "Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions," in *Autonomous Robots*, vol. 4, Kluwer Academic Publishers, 1997, pp. 7-27.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. P. Desai, V. Kumar, "Motion Planning for Cooperating Mobile Manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 16, no. 10, pp. 557-579, 1999.
- [6] Masakazu Fujii, Wataru Inamura, Hiroki Murakami, Kouji Tanaka, Kazuhiro Kosuge, "Cooperative Control of Multiple Mobile Robots Transporting a Single Object with Loose Handling," in *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Sanya, China, 2007.
- [7] X. Yang, K. Watanabe, K. Izumi, K. Kiguchi, "A decentralized control system for cooperative transportation by multiple non-holonomic mobile robots," *International Journal of Control*, vol. 77, no. 10, pp. 949-963, 2004.
- [8] Xin Chen, Yangmin Li, "Cooperative Transportation by Multiple Mobile Manipulators using Adaptive NN Control," in *The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network Proceedings*, Vancouver, BC, Canada, 2006.
- [9] A. Yamashita, T. Arai, Jun Ota, H. Asama, "Motion planning of multiple mobile robots for Cooperative manipulation and transportation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 12, pp. 223-237, 2003.
- [10] A. Loria, J. Dasdemir, N. Jarquín-Alvarez, "Decentralized formation-tracking control of autonomous vehicles on straight paths," in *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, Los Angeles, CA, USA, 2014.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- [11] W. Ren, H. Chao, W. Bourgeous, 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.
- [12] 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.
- [13] R. Carelli, C. De La Cruz, F. Roberti, "Centralized formation control of non-holonomic mobile robots," *Latin American Applied Research*, vol. 36, pp. 63-69, 2006.
- [14] T. v. d. Broek, "Formation Control of Unicycle Mobile Robots: Theory and Experiments," *Master's Thesis*, 23 October 2008.
- [15] G. Antonelli, F. Arrichiello, F. Caccavale, A. Marino, "Decentralized centroid and formation control for multi-robot systems," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 2013.
- [16] Z. Liu, W. Chen, J. Lu, H. Wang, J. Wang, "Formation Control of Mobile Robots Using Distributed Controller With Sampled-Data and Communication Delays," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 2125-2132, 2016.
- [17] 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.
- [18] X. Yu and L. Liu, "Distributed Formation Control of Nonholonomic Vehicles Subject to Velocity Constraints," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1289-1298, 2016.
- [19] 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.
- [20] Dongdong Xu, Xingnan Zhang, Zhangqing Zhu, Chunlin Chen, Pei Yang, "Behavior-Based Formation Control of Swarm Robots," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, pp. 1-13, 2014.
- [21] J. P. Desai, J. P. Ostrowski, V. Kumar, "Control of changes in formation for a team of mobile robots," in *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, USA, 1999.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- [22] 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.
- [23] B. Liu, R. Zhang, C. Shi, "Formation Control of Multiple Behavior-based robots," in *2006 International Conference on Computational Intelligence and Security*, Guangzhou, China, 2006.
- [24] Z. Zhang, R. Zhang and X. Liu, "Multi-Robot Formation Control Based on Behavior," in *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, Hubei, China, 2008.
- [25] 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.
- [26] F. Morbidi, "Leader-Follower Formation Control and Visibility Maintenance of Nonholonomic Mobile Robots," *Ph.D. Thesis*, March 2009.
- [27] J. P. Desai, J. P. Ostrowski, V. Kumar, "Controlling formations of multiple mobile robots," in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, 1998.
- [28] E. Pantely, E. Lefeber, A. Loria, H. Nijmeijer, "Exponential tracking control of a mobile car using a cascaded approach," *IFAC Workshop on Motion Control*, vol. 31, no. 27, pp. 201-206, 21-23 September 1998.
- [29] E. Lefeber, J. Jakubiak, K. Tchon, H. Nijmeijer, "Observer based kinematic tracking controllers for a unicycle-type mobile robot," in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea, South Korea, 2001.
- [30] J. Jakubiak, E. Lefeber, K. Tchon, H. Nijmeijer, "Two observer-based tracking algorithms for a unicycle mobile robot," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 12, no. 4, pp. 513-522, 2002.
- [31] A. Loria, J. Dasdemir, N. Jarquín-Alvarez, "Leader–Follower Formation and Tracking Control of Mobile Robots Along Straight Paths," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 727-732, March 2016.
- [32] Ti-Chung Lee, Kai-Tai Song, Ching-Hung Lee, Ching-Cheng Teng, "Tracking control of mobile robots using saturation feedback controller," in *Proceedings*

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

*1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, USA, USA, 1999.

- [33] Ti-Chung Lee, Kai-Tai Song, Ching-Hung Lee, Ching-Cheng Teng, "Tracking control of unicycle-modeled mobile robots using a saturation feedback controller," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 305-318, Mar 2001.
- [34] K. Cao, Y. Tian, "A Time-varying Cascaded Design for Trajectory Tracking Control of Nonholonomic Systems," in *2006 Chinese Control Conference*, Harbin, China, 2006.
- [35] K. Cao, "Formation control of multiple nonholonomic mobile robots based on cascade design," in *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, 2009.
- [36] 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.
- [37] Omar A.A. Orqueda, R. Fierro, "Robust Vision-based Nonlinear Formation Control," in *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- [43] J. Ghommam, M. Saad, F. Mnif, "Formation path following control of unicycle-type mobile robots," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] K. D. Do, "Formation Tracking Control of Unicycle-Type Mobile Robots With Limited Sensing Ranges," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 527-538, May 2008.
- [47] K. D. Do, "Formation tracking control of mobile robots with limited sensing and without velocity measurements," in *2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Hanoi, Vietnam, 2008.
- [48] J. Guo, Z. Lin, M. Cao, G. Yan, "Adaptive leader-follower formation control for autonomous mobile robots," in *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, Baltimore, MD, USA, 2010.
- [49] R. Jia, M. Yue, Y. Xu, "Adaptive Leader-Follower Formation Control of Wheeled Mobile Robots via Composite Techniques," in *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems*, Tianjin, China, China, 2018.
- [50] D. Shen, Z. Sun, W. Sun, "Leader-follower formation control without leader's velocity information," *Science China Information Sciences*, vol. 57, no. 9, p. 1–12, 2014.
- [51] X. Liang, H. Wang, Y. Liu, W. Chen and T. Liu, "Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots Without Position and Velocity Measurements," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 2, pp. 434-446, 2018.
- [52] N. Soltani, A. Shahmansoorian, M. A. Khosravi, "Robust distance-angle leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots," in *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, 2014.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- [53] Yingying Cheng, Ruting Jia, Haibo Du, Guangui Wen, Wenwu Zhu, "Robust finite-time consensus formation control for multiple nonholonomic wheeled mobile robots via output feedback," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, pp. 1-15, 15 Dec 2017.
- [54] S. Akiba, T. Zanma, M. Ishida, "Optimal tracking control of two-wheeled mobile robots based on model predictive control," in *11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Nagaoka, Niigata, Japan, 2010.
- [55] H. Bai, J. Gao, X. Sun, W. Yan, "Model Predictive Visual Trajectory-Tracking Control of Wheeled Mobile Robots," in *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics*, Vancouver, BC, Canada, 2019.
- [56] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy, W. Perruquetti, "Sliding-Mode Formation Control for Cooperative Autonomous Mobile Robots," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3944-3953, 15 August 2008.
- [57] R. Solea, A. Filipescu, G. Stamatescu, "Sliding-mode real-time mobile platform control in the presence of uncertainties," in *Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control*, Shanghai, China, 2009.
- [58] I. Anvari, "Non-holonomic Differential Drive Mobile Robot Control & Design: Critical Dynamics and Coupling Constraints," *Master of Science*, December 2013.
- [59] Dingyü Xue, YangQuan Chen, Derek P. Atherton, "PID Controller Design," in *Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, pp. 182-185.
- [60] D. Ibrahim, "Discrete Controller Design," in *Microcontroller Based Applied Digital Control*, John Wiley & Sons, Ltd, 2006, pp. 231-233.
- [61] 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.
- [62] A. Santos Branda, M. Sarcinelli-Filho, R. Carelli and T. F. Bastos-Filho, "Decentralized control of leader-follower formations of mobile robots with obstacle avoidance," in *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*, Malaga, Spain, 2009.
- [63] F. Yang, Fei Liu, S. Liu and C. Zhong, "Hybrid formation control of multiple mobile robots with obstacle avoidance," in *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 2010.

Tên đề tài: “Nghiên cứu thuật toán hợp tác và phối hợp ứng dụng trong hệ thống đa đổi tượng”.

- [64] H.M. Ha, A.D. Nguyen and Q.P. Ha, "Controlling formations of multiple mobile robots with inter-robot collision avoidance.," 2005.
- [65] A. Souliman, A. Joukhadar, H. Alturbeh and J. F. Whidborne, "Real time control of multi-agent mobile robots with intelligent collision avoidance system," in *2013 Science and Information Conference*, London, UK, 2013.

