

# **ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**



## **ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**

### **Thiết kế bộ điều khiển cho xe tự hành**

**TRƯƠNG BÁ BÌNH**

[binh.tb173665@sis.hust.edu.vn](mailto:binh.tb173665@sis.hust.edu.vn)

**TRẦN ĐỨC LONG**

[long.td181627@sis.hust.edu.vn](mailto:long.td181627@sis.hust.edu.vn)

**Ngành KT Điều khiển & Tự động hóa**

**Giảng viên hướng dẫn:** PGS. TS. Nguyễn Hoài Nam

---

Chữ ký của GVHD

**Bộ môn:** Tự động hóa

**Viện:** Điện – Điện tử

**HÀ NỘI, 3/2023**

**NHIỆM VỤ  
ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**

Họ và tên sinh viên: Trương Bá Bình – Trần Đức Long

Khóa: K62 – K63 Trường: Điện- Điện tử Ngành: KT ĐK &TĐH

*1. Tên đề tài:*

Thiết kế bộ điều khiển cho xe tự hành

*2. Nội dung đề tài:*

Thiết kế bộ điều khiển cho xe tự hành, áp dụng các thuật toán điều khiển để xe di chuyển theo quỹ đạo cho trước, mô phỏng mô hình xe và so sánh kết quả giữa các bộ điều khiển khác nhau bằng MatLab Simulink.

*3. Cán bộ hướng dẫn:* PGS.TS. Nguyễn Hoài Nam

*4. Thời gian giao đề tài:* 16/10/2022

*5. Thời gian hoàn thành:* 05/03/2023

*Ngày 05 tháng 03 năm 2023*

**CÁN BỘ HƯỚNG DẪN**

**PGS.TS. Nguyễn Hoài Nam**

## **ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP**

Thiết kế bộ điều khiển cho xe tự hành, áp dụng các thuật toán điều khiển để xe di chuyển theo quỹ đạo cho trước, mô phỏng mô hình xe và so sánh kết quả giữa các bộ điều khiển khác nhau bằng MatLab Simulink.

### **Lời cảm ơn**

Đầu tiên, trước khi bắt đầu nội dung của báo cáo đồ án tốt nghiệp này, em xin chân thành gửi lời cảm ơn đến thầy và những người đã hỗ trợ, giúp đỡ chúng em về cả kiến thức lẫn kỹ năng cần thiết để thực hiện đồ án này.

Em xin chân thành cảm ơn thầy Nguyễn Hoài Nam, thuộc khoa Tự động hóa, trường Điện – Điện tử, người đã trực tiếp hướng dẫn, đánh giá, định hướng chúng em trong suốt quá trình làm đồ án này.

Em cũng muốn gửi lời cảm ơn đến tất cả thầy cô đã nỗ lực, giảng dạy, dẫn dắt vấn đề cho chúng em từ những năm hai, năm ba. Điều đó giúp chúng em có cái nhìn tổng quan hơn về ngành học cũng như hệ thống hóa kiến thức khi đã là sinh viên tự động hóa, đặc biệt với các thầy cô từng ở Bộ môn Điều Khiển Tự Động, đã cung cấp kiến thức nền tảng để chúng em thực hiện đồ án này.

Tuy nhiên, trong quá trình làm đồ án, một số kiến thức và kỹ năng của em vẫn còn hạn chế nên không tránh khỏi việc thiếu sót khi trình bày nội dung đồ án tốt nghiệp, em mong thầy cô bộ môn đóng góp ý kiến để đồ án này trở nên hoàn thiện hơn.

Chúng em xin chân thành cảm ơn!

## **Tóm tắt nội dung đồ án**

Xe tự hành đã được nghiên cứu từ sớm và vẫn trở thành đề tài phổ biến được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp như phương tiện tự lái, vận chuyển, hay nó được sử dụng các phòng thí nghiệm với các thuật toán điều khiển phức tạp có sử dụng công cụ mờ, mạng nơron, để xử lý các bài toán, hay dùng để làm tài liệu môn học trong cho sinh viên và giảng viên ứng dụng để nghiên cứu và giảng dạy. Tùy vào từng môi trường làm việc khác nhau, xe tự hành có thể được phân ra nhiều loại như xe truyền động hai bánh, hoặc là xe ba bánh, xe ackermann, hay xe mecanum,... Trong số đó, xe truyền động hai bánh là đối tượng điều khiển đơn giản với hai tín hiệu điều khiển tác động vào momen của hai bánh giúp hệ vật có thể di chuyển và có thể thực hiện được các thuật toán điều khiển như bám quỹ đạo hay mở rộng hơn là điều khiển hệ tác tử xe tự hành. Ở đây mô hình xe tự hành của chúng có 6 bánh tuy nhiên bài toán đặt ra chỉ điều khiển hai bánh nên chúng em sẽ xây dựng đối tượng mô hình xe hai bánh cho mô hình động lực học.

Mục tiêu đồ án đề ra là xây dựng mô hình toán học và thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo cho xe truyền động hai bánh. Để kiểm chứng tính đúng sai của lý thuyết, nhóm sẽ sử dụng phần mềm Matlab/Simulink và nhận xét, so sánh kết quả bộ điều khiển nhóm thiết kế ra. Nội dung đồ án sẽ bao gồm trong các chương:

Chương 1: Tổng quan

Chương 2: Mô hình hóa đối tượng

Chương 3: Thiết kế bộ điều khiển

Chương 4: Kết quả mô phỏng

Chương 5: Kết luận và hướng phát triển

Sinh viên thực hiện

Ký và ghi rõ họ tên

## MỤC LỤC

<b>CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN .....</b>	<b>11</b>
1.1 Tổng quan về Robot.....	11
1.2 Phân loại Robot tự hành.....	12
1.2.1 Robot tự hành di chuyển bằng chân (Legged Robot) .....	12
1.2.2 Robot tự hành di chuyển bằng bánh (Xe tự hành) .....	13
1.3 Điều khiển hoạt động của xe tự hành .....	14
1.3.1 Định tuyến dựa trên dây .....	14
1.3.2 Định tuyến dựa trên băng từ .....	14
1.3.3 Hướng dẫn thị giác.....	15
1.3.4 Hướng dẫn bằng laser .....	15
1.4 Giới thiệu chung về mô hình hệ thống .....	16
1.5 Đối tượng nghiên cứu và yêu cầu đặt ra .....	17
<b>CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH HÓA ĐỐI TƯỢNG.....</b>	<b>18</b>
2.1 Giới thiệu hệ trục tọa độ .....	18
2.2 Điều kiện ràng buộc non-holonomic .....	18
2.3 Mô hình hóa động lực học .....	20
2.4 Mô hình hóa cơ cấu chấp hành .....	24
<b>CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Bộ điều khiển động lực học .....	25
3.1.1 Xây dựng bộ điều khiển phản hồi trạng thái.....	25
3.1.2 Xây dựng bộ điều khiển trượt .....	26
3.2 Bộ điều khiển bám quỹ đạo .....	27
3.3 Bộ điều khiển cho hệ cơ cấu chấp hành.....	29
3.3.1 Nhận dạng mô hình dòng động cơ .....	29
3.3.2 Thiết kế bộ điều khiển dòng và mô hình.....	30
3.3.3 Kết quả mô phỏng của các bộ điều khiển .....	34
<b>CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG .....</b>	<b>36</b>
4.1 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe .....	37
4.2 Tín hiệu sai lệch điều khiển vận tốc .....	40
4.3 Tín hiệu điều khiển dòng điện .....	41
4.4 Nhận xét.....	43
<b>CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN .....</b>	<b>44</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>45</b>

**PHỤ LỤC..... 46**  
Lý thuyết ổn định Lyapunov ..... 46

## DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

<b>OSA</b>	Overshoot and Settling Time Assignment(Gán độ quá điều chỉnh và thời gian xác lập)
<b>GA</b>	Genetic Algorithms (Giải thuật di truyền)



## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Robot tự hành di chuyển bằng chân trong thực tế.....	13
Hình 1.2 Một số mẫu xe tự hành trong công nghiệp .....	14
Hình 1.3 Mô hình xe định tuyến dựa trên dây.....	14
Hình 1.4 Mô hình xe tự hành sử dụng thị giác máy tính.....	15
Hình 1.5 Mô hình xe sử dụng cảm biến laser .....	16
Hình 2.1 Mô hình tổng quan.....	18
Hình 2.2 Vận tốc dài của bánh xe.....	19
Hình 2.3 Sơ đồ động cơ một chiều .....	24
Hình 3.1 Sơ đồ khối mô hình hệ kín.....	25
Hình 3.2 Các biến sai lệch trạng thái của hệ vật .....	27
Hình 3.3 Đồ thị nhận dạng hàm truyền động cơ DC .....	29
Hình 3.4 Lưu đồ thuật toán giải thuật di truyền GA .....	31
Hình 3.5 Mô hình mờ Mamdani .....	31
Hình 3.6 Mô hình bộ điều khiển Mờ P .....	32
Hình 3.7 Các tập mờ đầu vào của bộ điều khiển.....	33
Hình 3.8 Các tập mờ đầu ra của bộ điều khiển.....	34
Hình 3.9 Tín hiệu đáp ứng dòng của động cơ một chiều .....	35
Hình 4.1 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển bằng phần mềm Matlab .....	37
Hình 4.2 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển phản hồi trạng thái - OSA .....	37
Hình 4.3 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển trượt - OSA ..	38
Hình 4.4 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển phản hồi trạng thái - GA .....	38
Hình 4.5 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển trượt - GA ...	39
Hình 4.6 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển phản hồi trạng thái – mờ P.....	39
Hình 4.7 Sai lệch vận tốc dài và vận tốc góc phản hồi trạng thái – OSA .....	40
Hình 4.8 Sai lệch vận tốc dài và tốc độ góc bộ điều khiển trượt - OSA .....	40
Hình 4.9 Sai lệch vận tốc dài và tốc độ góc bộ điều khiển phản hồi trạng thái - GA.....	40
Hình 4.10 Sai lệch vận tốc dài và tốc độ góc bộ điều khiển trượt - GA .....	41
Hình 4.11 Sai lệch vận tốc dài và vận tốc góc phản hồi trạng thái – mờ P....	41
Hình 4.12 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải phản hồi trạng thái - OSA .....	41
Hình 4.13 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải trượt - OSA ....	42
Hình 4.14 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải phản hồi trạng thái - GA .....	42

Hình 4.15 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải trượt - GA.....	42
Hình 4.16 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải phản hồi trạng thái – mờ P .....	43

## **DANH MỤC BẢNG**

Bảng 1 Thông số mô hình xe tự hành .....	36
--	----

## CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

### 1.1 Tổng quan về Robot

Robot là một loại máy móc có thể thực hiện những công việc một cách tự động bằng sự điều khiển của máy tính hoặc các vi mạch điện tử được lập trình. Robot là sản phẩm được con người chế tạo bằng cơ khí, thường là một hệ thống cơ khí – điện tử.

Ngày nay, Robot đã đạt được những thành tựu to lớn trong nền sản xuất công nghiệp. Những cánh tay robot có khả năng làm việc với tốc độ cao, chính xác và liên tục làm cho năng suất lao động tăng nhiều lần. Robot có thể thực hiện các công việc nguy hiểm như hàn, phun sơn, làm việc trong nhà máy điện hạt nhân hoặc lắp ráp các bộ phận điện phức tạp cho những thứ như máy tính và điện thoại thông minh.... Tuy nhiên, không gian làm việc của những robot này có một hạn chế chung. Số bậc tự do mà người thao tác có và vị trí lắp đặt cũng hạn chế không gian làm việc của nó.

Robot tự hành có thể tự di chuyển và thực hiện các nhiệm vụ mà không cần sự trợ giúp của con người. Họ có thể cảm nhận được môi trường xung quanh nhờ các cảm biến. Robot tự hành ngày càng trở nên hữu ích hơn trong nhiều lĩnh vực, bao gồm sản xuất, thương mại, y tế và nghiên cứu khoa học. Robot tự hành đang trở nên dễ thích nghi hơn để hoạt động trong nhiều tình huống khi ngành công nghiệp robot phát triển, tuy nhiên, mỗi lĩnh vực ứng dụng lại có nhiều loại robot khác nhau, chẳng hạn như robot sơn, robot hàn, robot cắt cỏ và robot dò địa hình. Robot tự hành tiếp tục đặt ra những khó khăn mới cho các nhà nghiên cứu khi yêu cầu sử dụng ngày càng tăng.

Thách thức đối với robot tự động là tìm ra cách khiến chúng tự di chuyển, nhận biết môi trường xung quanh và thực hiện các nhiệm vụ được giao. Vấn đề đầu tiên là khả năng di chuyển của robot tự động và lựa chọn cơ chế di chuyển tốt nhất. Trong quá trình phát triển robot tự động, điều hướng là một vấn đề quan trọng. Hai lĩnh vực nghiên cứu riêng biệt tồn tại trong lĩnh vực robot tự trị:

- Lĩnh vực nghiên cứu đầu tiên là phát triển robot tự hành, di chuyển nhanh, có thể hoạt động cả bên trong và bên ngoài tòa nhà. Những robot này có thể sử dụng dữ liệu cảm biến để điều hướng ở tốc độ cao. Để có thể điều khiển robot di chuyển với tốc độ cao, trong môi trường có địa hình phức tạp, cần rất nhiều sức mạnh máy tính và cảm biến có độ nhạy cao, dải đo rộng.

- Loại thứ hai: để giải quyết các vấn đề với robot tự hành chỉ được sử dụng cho các hoạt động trong phòng. Đây là loại robot tự hành, thực hiện các công việc đơn giản, có cấu tạo đơn giản hơn loại kể trên.

Có hai loại vấn đề hướng dẫn đối với robot tự động: khó khăn toàn cầu và thách thức cục bộ. Môi trường làm việc cho robot hoàn toàn được xác định trước trong bài toán chung và trở ngại hoàn toàn được hiểu trước. Môi trường làm việc của robot không được biết hoặc chỉ được biết một phần trong vấn đề cục bộ. Các cảm biến và thiết bị định vị cho phép robot xác định được vật cản, vị trí của nó trong môi trường giúp nó đi tới được mục tiêu.

Các vấn đề với điều hướng robot tự động thường giống như các vấn đề xảy ra với các loại robot khác. Sự khác biệt chính giữa phán đoán thời gian thực và kỹ thuật lập kế hoạch ngoại tuyến là các quyết định thời gian thực đối với robot tự động phải dựa trên đầu vào liên tục về môi trường từ các cảm biến, dù ở trong nhà hay ngoài trời. Robot tự hành phải có khả năng tự quyết định về phương hướng, định hướng chuyển động để có thể tới đích thực hiện nhiệm vụ nhất định.

## **1.2 Phân loại Robot tự hành**

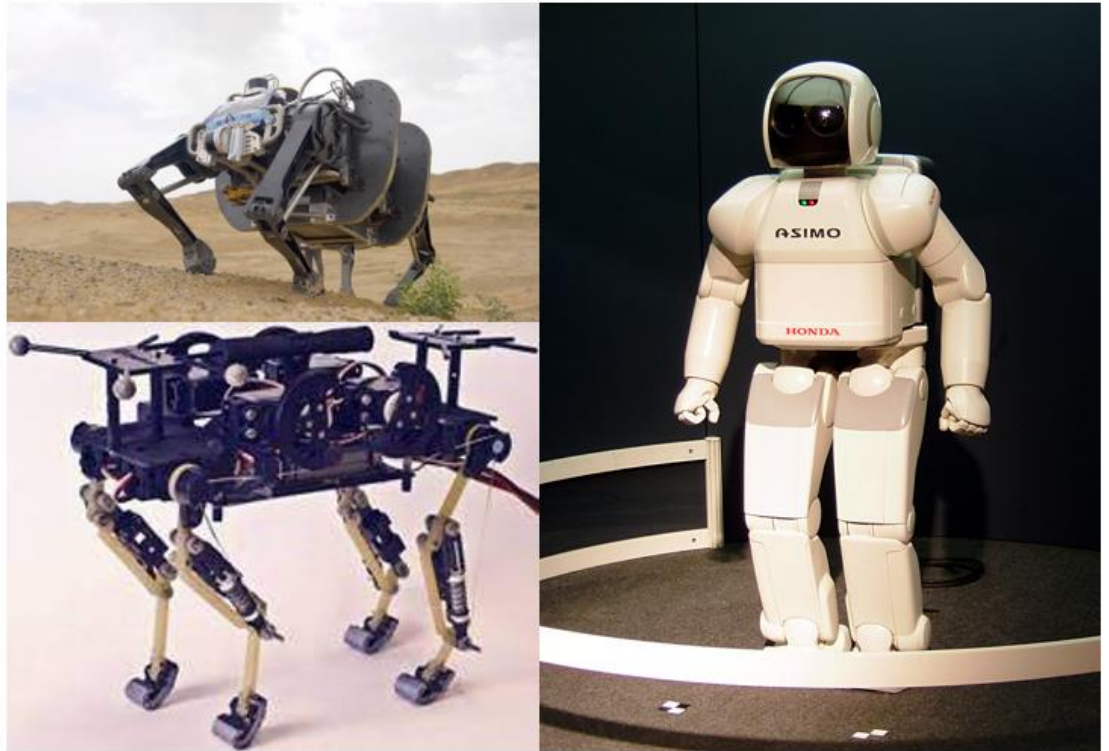
Robot tự hành được chia làm 2 loại chính đó là loại tự hành bằng chân và Robot tự hành chuyển động bằng bánh. Ngoài ra một số loại robot hoạt động trong các môi trường đặc biệt như dưới nước hay trên không trung thì chúng trang bị cơ cấu di chuyển đặc trưng riêng của nó.

### **1.2.1 Robot tự hành di chuyển bằng chân (Legged Robot)**

Ưu điểm lớn nhất của loại robot này là có thể thích nghi và di chuyển trên các địa hình gồ ghề. Hơn nữa chúng còn có thể đi qua những vật cản như hố, vết nứt sâu.

Nhược điểm chính của loại robot loại này chính là chế tạo quá phức tạp. Chân robot là kết quả của nhiều bậc tự do, đây là nguyên nhân làm tăng trọng lượng của robot đồng thời giảm thời gian tốc độ di chuyển. Các kỹ năng như cầm, nắm hay nâng tải cũng là nguyên nhân làm giảm tốc độ cứng vững của robot. Robot loại này càng linh hoạt thì chi phí chế tạo càng cao.

Robot tự hành di chuyển bằng chân được mô phỏng theo các loài động vật vì thế mà chúng có loại 1 chân, loại 2,4,6 chân và có thể nhiều hơn. Dưới đây là một số loại robot điển hình chuyển động bằng chân [15].



*Hình 1.1 Robot tự hành di chuyển bằng chân trong thực tế*

### **1.2.2 Robot tự hành di chuyển bằng bánh (Xe tự hành)**

Bánh xe là cơ cấu chuyển động được sử dụng rộng rãi nhất trong công nghệ Robot tự hành. Trong xe tự hành từ ba bánh, các vấn đề về thăng bằng thường không quan trọng. Cấu trúc cân bằng nhất có ba bánh xe, trong khi hai bánh xe cũng có thể được cân bằng. Thông thường, hệ thống treo phải được chế tạo sao cho tất cả các bánh xe tiếp xúc với mặt đất khi xe có nhiều hơn ba bánh. Lực kéo, độ ổn định, kiểm soát chuyển động và các vấn đề khác là những vấn đề xảy ra với xe có nhiều bánh. Dưới đây giới thiệu một số loại bánh xe cơ bản được sử dụng trong xe tự hành [17]:

- a. Bánh xe tiêu chuẩn: 2 bậc tự do, có thể quay quanh trục bánh xe và điểm tiếp xúc.
- b. Bánh lái: 2 bậc tự do, có thể quay xung quanh khớp lái.
- c. Bánh Swedish: 3 bậc tự do, có thể quay đồng thời xung quanh trục bánh xe, trục con lăn và điểm tiếp xúc.

Vấn đề số bánh xe trên xe tự hành cũng khá quan trọng, tùy thuộc vào môi trường vận hành của xe. Trong đồ án chúng em tập trung vào xe tự hành trong công nghiệp. Việc vận hành xe tự hành trong công nghiệp thường sử dụng xe có nhiều hơn 4 bánh xe. Tùy vào mục đích sử dụng như xe kéo thường sẽ có 4 bánh xe, xe nâng sẽ có 6 bánh xe giúp trọng tải trên mỗi bánh được giảm nhẹ. Hình 2 dưới đây là một số mẫu xe tự hành trong công nghiệp [16].



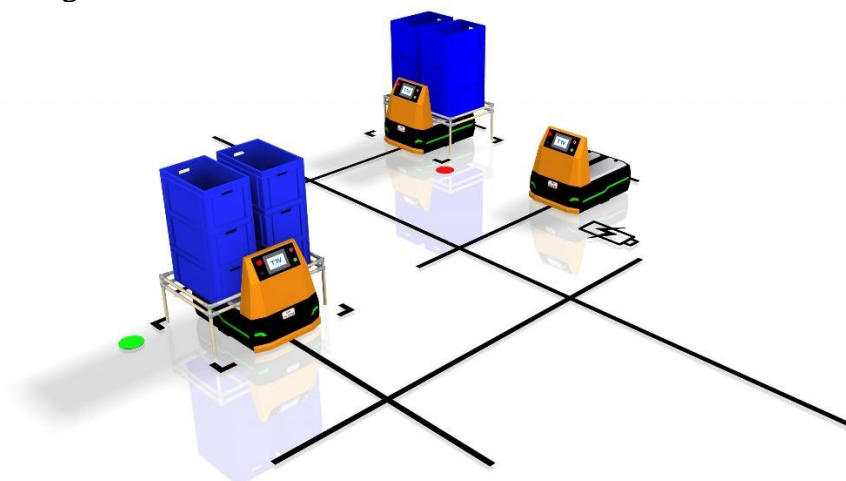
Hình 1.2 Một số mẫu xe tự hành trong công nghiệp

### 1.3 Điều khiển hoạt động của xe tự hành

Xe tự hành hoạt động bằng cách sử dụng một số phương pháp khác nhau, nhưng tuân theo cùng một nguyên tắc cơ bản để hoạt động, xe sẽ đi theo một con đường hoặc một cảm biến đưa ra phản hồi cho hệ thống điều khiển.

#### 1.3.1 Định tuyến dựa trên dây

Một trong những hệ thống cơ bản nhất để giữ cho xe tự hành đi đúng hướng là đặt một sợi dây trong nền bê tông để phát ra tín hiệu vô tuyến cho xe chạy theo. Một rãnh nông được cắt dọc theo con đường dự định trong nhà kho nơi xe dự định hoạt động. Một dây có khả năng tạo ra tín hiệu cho AGV đi theo được nhúng vào sàn. Sau khi xác định được đường đi, một cảm biến trên xe sẽ được sử dụng để phát hiện tín hiệu truyền từ dây. Đây là một hệ thống đơn giản nhưng không dễ thay đổi một khi đường dẫn đã được thiết lập bởi vì dây được gắn cố định trong sàn.



Hình 1.3 Mô hình xe định tuyến dựa trên dây

#### 1.3.2 Định tuyến dựa trên băng từ

Khái niệm về định tuyến dựa trên băng từ rất giống với định tuyến dựa trên dây. Robot có một cảm biến đi theo một đường dẫn được làm bằng băng từ. Băng từ có thể có màu hoặc từ tính. Mỗi biến thể đều có loại hệ thống cảm biến

riêng và chúng không thể thay thế cho nhau. Định tuyến bằng từ có ưu điểm là dễ dàng sửa đổi để tạo ra các đường dẫn mới, trong khi định tuyến có dây thì tốn kém và khó thay đổi dựa trên vị trí cố định của nó.

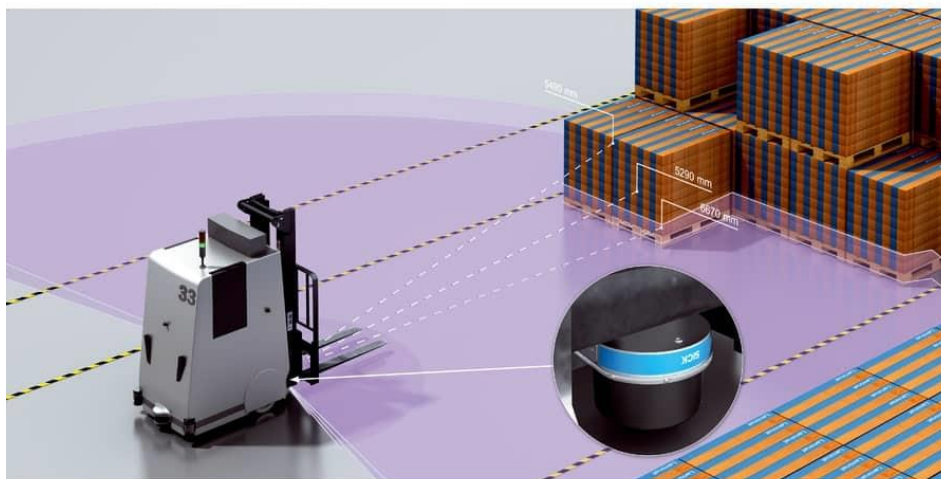
Một bất lợi của việc sử dụng băng từ là nó có xu hướng bị hỏng ở những khu vực có lưu lượng truy cập cao, nơi băng bị mòn theo thời gian khiến xe tự hành không thể đọc được. Một khi băng từ buộc phải được thay thế, nó có thể dẫn đến tăng chi phí bảo trì và mất khả năng sản xuất trong thời gian đó.

AGV cảm biến băng từ sử dụng một cảm biến phát hiện các biến thể màu sắc trên sàn nhà. Vì băng từ có màu khác với phần còn lại của sàn nên nó có thể cảm nhận được sự khác biệt và điều chỉnh đường đi của nó cho phù hợp. Băng dính màu nói chung là một phương pháp tạo đường dẫn ít tốn kém hơn các phương pháp khác và mang lại lợi thế là dễ dàng điều chỉnh để tạo ra các đường dẫn khác nhau.

Băng từ được sử dụng giống như băng màu nhưng sử dụng một dải từ hóa để tạo đường dẫn. Một cảm biến được sử dụng để theo dõi băng bằng cách đọc từ tính có trong băng.

### 1.3.3 Hướng dẫn thị giác

Hệ thống hướng dẫn thị giác sử dụng thị giác máy tính để giải thích môi trường xung quanh xe tự hành. Điều này mang lại nhiều lợi thế so với hệ thống dựa trên đường dẫn. Nó tạo ra khả năng không giới hạn số lượng đường dẫn, tăng hiệu quả và tiết kiệm thời gian giữa các tác vụ. Hệ thống định hướng thị giác không cần thay đổi cơ sở hạ tầng của nhà máy. Nó ghi lại các đặc điểm trong môi trường của nó và sử dụng thông tin đó để giải thích môi trường xung quanh nó. Mặc dù hệ thống thị giác phức tạp hơn nhưng nó giúp tiết kiệm một số chi phí vì không cần thay đổi thêm để nó thực hiện nhiệm vụ dự định.



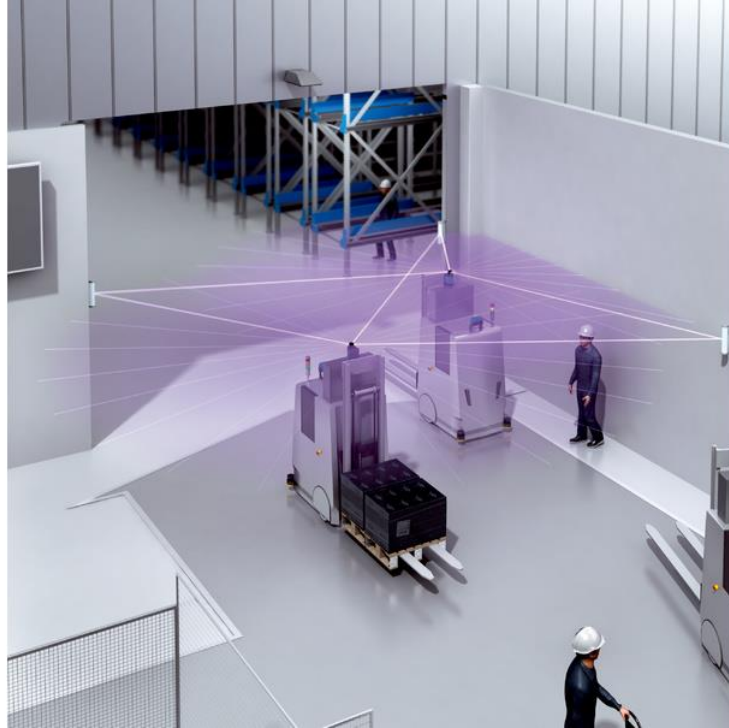
Hình 1.4 Mô hình xe tự hành sử dụng thị giác máy tính

### 1.3.4 Hướng dẫn bằng laser

Hệ thống dẫn đường bằng laser dựa trên tia laser quay để cung cấp thông tin cần thiết cho bộ phận điều khiển trên xe. Bộ phận laser phát ra các xung laser trong bán kính 360 độ. Nó nhận lại chùm tia vào hệ thống và sử dụng nó để vạch ra môi trường xung quanh.



Laser rất phức tạp nhưng cho độ chính xác cao và có thể thích ứng với môi trường thay đổi. Khả năng thích ứng với môi trường xung quanh làm cho AGV dẫn đường bằng laser trở nên cực kỳ linh hoạt. Chi phí tăng thêm là hợp lý trong một môi trường liên tục thay đổi và tăng thêm sự an toàn cho người lao động xung quanh vì nó có thể phát hiện khi nào người lao động đang đi trên đường của nó.



Hình 1.5 Mô hình xe sử dụng cảm biến laser

#### 1.4 Giới thiệu chung về mô hình hệ thống

Để diễn tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào và đầu ra của hệ thống, ta xây dựng mô hình toán học từ những phương trình vi phân. Một hệ thống có thể được mô tả dưới dạng phi tuyến hoặc tuyến tính.

Mô hình toán học của hệ thống tuyến tính thỏa mãn tính chất nguyên lý xếp chồng. Có thể phân tích các đặc điểm của hệ thống tuyến tính bằng cách xác định các điểm cực. Thường, đối với hệ thống liên tục, hệ ổn định khi mà các điểm cực nằm ở bên trái trục ảo. Tuy nhiên, đặc tính của hệ thống xe tự hành hoặc nhiều hệ thống thực tế khác có mô hình toán học là một hệ phi tuyến.

Để xây dựng và mô hình hóa xe tự hành, có thể sử dụng các định luật Newton hoặc là hệ phương trình Euler – Lagrange, dùng để diễn tả mối quan hệ giữa các đại lượng chuyển động của vật và các lực tương tác cơ học giữa các vật thể trong không gian. Hướng tiếp cận Euler – Lagrange thường được sử dụng để mô tả tính động lực học của hệ một cách khái quát, đặc biệt hệ vật chuyển động quay trong không gian hai chiều hay ba chiều.

Khi thiết kế bộ điều khiển cho hệ phi tuyến, thường sẽ có hai phương pháp chính là tuyến tính hóa chính xác hoặc tuyến tính hóa quanh điểm làm việc. Phương pháp tuyến tính hóa quanh điểm làm việc chỉ phù hợp với các điểm làm

việc lân cận trong khi phương pháp tuyến tính hóa chính xác điều khiển hệ thành hệ tuyến tính trong toàn bộ không gian trạng thái.

### **1.5 Đối tượng nghiên cứu và yêu cầu đặt ra**

Đối tượng được nghiên cứu trong đề án này là xe tự hành sáu bánh, lý do sử dụng xe sáu bánh vì trọng tải của xe sẽ được phân bố đồng đều qua các bánh xe. Tuy nhiên trong phạm vi nghiên cứu đề án, nhóm chỉ sử dụng mô hình truyền động xe hai bánh với mục đích điều khiển xe bám quỹ đạo đặt ra.

Từ đó, nhóm cần phải xây dựng mô hình toán học của xe hai bánh thông qua hướng tiếp cận Euler – Lagrange và xây dựng cả mô hình sai lệch động học và cả mô hình cơ cấu chấp hành. Với từng mô hình toán học xây dựng được, nhóm sẽ phân tích và thiết kế thuật toán điều khiển bao gồm hai bộ điều khiển cho mô hình động lực học là điều khiển trượt và điều khiển phản hồi trạng thái, ba bộ điều khiển cho hệ cơ cấu chấp hành (động cơ) là gán độ quá điều chỉnh và thời gian xác lập (OSA), giải thuật di truyền (GA) và bộ điều khiển Mờ tỉ lệ.

Để kiểm chứng lý thuyết đặt ra, phần mềm Matlab/Simulink được sử dụng trong đề án nghiên cứu đề ra.

## CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH HÓA ĐỐI TƯỢNG

Ta thiết lập các chuỗi mô hình chuyển động của hệ thống đối tượng bằng việc xây dựng mô hình động lực học như sau [1]:

### 2.1 Giới thiệu hệ trục tọa độ

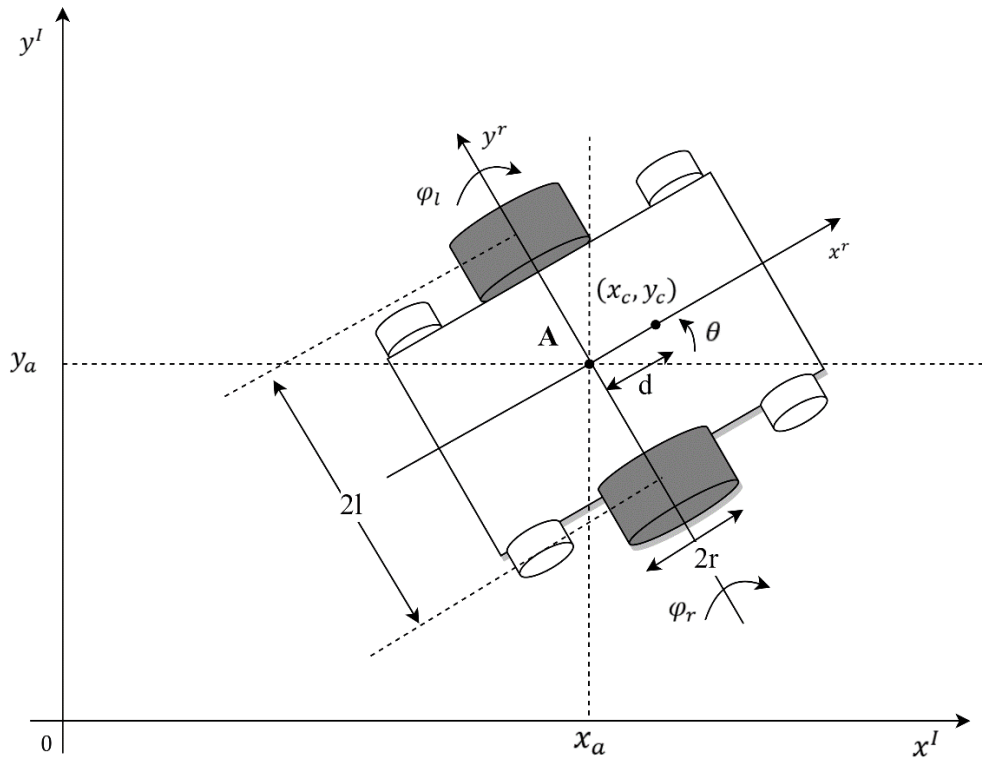
Để miêu tả vị trí của WMR, ta có thể dùng 2 hệ trục tọa độ: hệ tọa độ quán tính hoặc hệ tọa độ gắn với thân xe robot.

Đặt  $X^r = [x^r \ y^r \ \theta^r]^T$ , và  $X^I = [x^I \ y^I \ \theta^I]^T$  lần lượt là hệ trục tọa độ robot và quán tính, khi đó chúng liên hệ với nhau bằng công thức:

$$X^I = R(\theta) X^r \quad (2.1)$$

Trong đó:  $R(\theta)$  là ma trận xoay:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



Hình 2.1 Mô hình tổng quan

Điều này đúng khi áp dụng cho chuyển động giữa các hệ trục tọa độ:

$$\dot{X}^I = R(\theta) \dot{X}^r \quad (2.3)$$

### 2.2 Điều kiện ràng buộc non-holonomic

Chuyển động của hệ truyền động hai bánh luôn phải chịu 2 phương trình ràng buộc như sau:

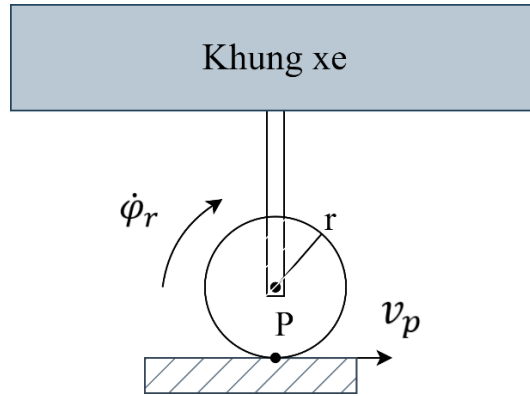
1. Xe không thể di chuyển ngang:

$$-\dot{x}_a \sin \theta + \dot{y}_a \cos \theta = 0 \quad (2.4)$$

2. Bánh xe chuyển động tịnh tiến phải xét đến hệ số trượt.

Tuy nhiên để đơn giản vấn đề thì bỏ qua hệ số trượt. Khi đó vận tốc dài của mỗi bánh xe tại điểm P được tính như sau:

$$\begin{cases} v_{pR} = r\dot{\phi}_R \\ v_{pL} = r\dot{\phi}_L \end{cases} \quad (2.5)$$



Hình 2.2 Vận tốc dài của bánh xe

Ngoài ra ta tính được vận tốc dài và vận tốc góc của robot:

$$\begin{cases} v = \frac{v_{pR} + v_{pL}}{2} = \frac{r}{2}(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L) \\ w = \frac{v_{pR} - v_{pL}}{2l} = \frac{r}{2l}(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L) \end{cases} \quad (2.6)$$

Khi đó hệ trục tọa độ cố định của robot được miêu tả như sau:

$$\begin{cases} x_{pR} = x_a + l \sin \theta \\ y_{pR} = y_a - l \cos \theta \\ x_{pL} = x_a - l \sin \theta \\ y_{pL} = y_a + l \cos \theta \end{cases} \quad (2.7)$$

Đạo hàm phương trình (2.7) ta được:

$$\begin{cases} \dot{x}_{pR} = \dot{x}_a + l\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y}_{pR} = \dot{y}_a + l\dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{x}_{pL} = \dot{x}_a - l\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y}_{pL} = \dot{y}_a - l\dot{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (2.8)$$

Từ phương trình (2.5) ta có:

$$\begin{cases} \dot{x}_{pR} \cos \theta + \dot{y}_{pR} \sin \theta = r\dot{\phi}_R \\ \dot{x}_{pL} \cos \theta + \dot{y}_{pL} \sin \theta = r\dot{\phi}_L \end{cases} \quad (2.9)$$

Kết hợp (2.4) (2.8) (2.9) ta được điều kiện ràng buộc nonholomic:

$$\begin{cases} -\dot{x}_a \sin \theta + \dot{y}_a \cos \theta = 0 \\ \dot{x}_a \cos \theta + \dot{y}_a \sin \theta + l\dot{\theta} - r\dot{\varphi}_R = 0 \\ \dot{x}_a \cos \theta + \dot{y}_a \sin \theta - l\dot{\theta} - r\dot{\varphi}_L = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Đặt biến khớp tọa độ  $q = [x_a \quad y_a \quad \theta \quad \varphi_R \quad \varphi_L]^T$  khi đó ta có thể viết lại phương trình (2.10) dưới dạng ma trận:

$$\Lambda(q)\dot{q} = 0 \quad (2.11)$$

Trong đó  $\Lambda(q)$  còn được gọi là ma trận ràng buộc:

$$\Lambda(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & l & -r & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -l & 0 & r \end{bmatrix}$$

### 2.3 Mô hình hóa động lực học

Để miêu tả quan hệ giữa chuyển động và lực tác động của hệ, phương trình động lực học được xây dựng theo phương trình Euler-Lagrange như sau:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} = F - \Lambda(q)^T \lambda \quad (2.12)$$

Trong đó:  $q_i$  tọa độ mỗi biến khớp

$F$  tổng ngoại lực tác động lên hệ

$\Lambda(q)$  ma trận ràng buộc

$\lambda$  là hệ số Lagrange theo ma trận ràng buộc

$L$  biểu thức Lagrange

Biểu thức Lagrange được tính như sau:

$$L = \sum K - \sum P \quad (2.13)$$

Với  $\sum K$  là tổng động năng của hệ,  $\sum P$  là tổng thế năng của hệ. Giả sử hệ robot chuyển động ở mặt phẳng với thế năng không đổi  $\sum P = 0$ , khi đó ta tính được động năng của xe như sau:

$$K_c = \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}^2 \quad (2.14)$$

Trong đó:

$m_c$ : Khối lượng của xe (không bao gồm bánh xe)

$I_c$ : Mô men quán tính của thân xe

Tương tự với 2 bánh phải và trái ta có:

$$\begin{cases} K_R = \frac{1}{2}m_w v_{wR}^2 + \frac{1}{2}I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_w \dot{\phi}_R^2 \\ K_L = \frac{1}{2}m_w v_{wL}^2 + \frac{1}{2}I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_w \dot{\phi}_L^2 \end{cases} \quad (2.15)$$

Trong đó:

$K_R$ : Động năng bánh phải

$K_L$ : Động năng bánh trái

$I_m$ : Mô men quán tính của bánh xe quanh trọng tâm của xe

$I_w$ : Mô men quán tính của một bánh xe

$m_w$ : Khối lượng của một bánh xe

$\phi_R$ : Góc quay của bánh xe phải

$\phi_L$ : Góc quay của bánh xe trái

Giả sử tâm quay của robot là điểm  $C(x_c, y_c)$  khi đó hệ tọa độ quán tính của xe được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} x_c = x_a + d \cos \theta \\ y_c = y_a + d \sin \theta \\ \dot{x}_c = \dot{x}_a - d \dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{y}_c = \dot{y}_a + d \dot{\theta} \cos \theta \end{cases} \quad (2.16)$$

Khi đó các đại lượng vận tốc có thể biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} v_c^2 = (\dot{x}_a - d \dot{\theta} \sin \theta)^2 + (\dot{y}_a + d \dot{\theta} \cos \theta)^2 \\ v_{wr}^2 = (\dot{x}_a + l \dot{\theta} \cos \theta)^2 + (\dot{y}_a + l \dot{\theta} \sin \theta)^2 \\ v_{wl}^2 = (\dot{x}_a - l \dot{\theta} \cos \theta)^2 + (\dot{y}_a - l \dot{\theta} \sin \theta)^2 \end{cases} \quad (2.17)$$

Thay (2.17) vào (2.14) – (2.15) ta thu được biểu thức Lagrange:

$$L = \frac{1}{2}m(\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) + m_c d \dot{\theta}(\dot{y}_a \cos \theta - \dot{x}_a \sin \theta) + \frac{1}{2}I_w(\dot{\phi}_R^2 + \dot{\phi}_L^2) + \frac{1}{2}I \dot{\theta}^2 \quad (2.18)$$

Trong đó  $m = m_c + 2m_w$  là tổng khối lượng robot.

$I = I_c + m_c d^2 + 2m_w L^2 + 2I_m$  là tổng momen quán tính robot.

Với biến khớp  $q = [x_a \ y_a \ \theta \ \phi_R \ \phi_L]^T$ , thay (2.18) vào (2.12) ta thu được hệ phương trình động lực học của hệ:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_a - m_c d\ddot{\theta} \sin \theta - m_c d\dot{\theta}^2 \cos \theta = C_1 \\ m\ddot{y}_a + m_c d\ddot{\theta} \cos \theta - m_c d\dot{\theta}^2 \sin \theta = C_2 \\ I\ddot{\theta} - m_c d\ddot{x}_a \sin \theta + m_c d\ddot{y}_a \cos \theta = C_3 \\ I_w \ddot{\phi}_R = \tau_R + C_4 \\ I_w \ddot{\phi}_L = \tau_L + C_5 \end{cases} \quad (2.19)$$

Với

$$-\Lambda(q)^T \lambda = - \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & l & -l \\ 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & -r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Trong đó:  $C_i$  là các hệ số ràng buộc động học.

Từ (2.19) ta viết lại dưới dạng ma trận:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (2.21)$$

Trong đó các ma trận:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -m_c d \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & m_c d \cos \theta & 0 & 0 \\ -m_c d \sin \theta & m_c d \cos \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix},$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_c d \dot{\theta} \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_c d \dot{\theta} \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}, \Lambda^T = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & l & -l \\ 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & -r \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}$$

Có thể giải các nghiệm  $\lambda_i$  từ phương trình (2.19), tuy nhiên việc tính toán sẽ trở nên phức tạp và cồng kềnh, ta có thể xử lý thành phần  $-\Lambda(q)^T \lambda$  như sau:

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (2.22)$$

$$\text{Với } S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix}$$

Phương trình (2.22) cũng có thể được coi là mô hình động học, dùng để diễn tả mối quan hệ giữa vị trí và vận tốc của hệ robot. Đạo hàm (2.22) ta được:

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \quad (2.23)$$

Ta có tính chất:

$$S^T(q)\Lambda^T(q) = \Theta \quad (2.24)$$

Nhân ma trận  $S^T(q)$  với cả 2 vế của phương trình (2.21) ta được:

$$S^T(q) \left[ M(q) \left[ \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \right] + V(q, \dot{q})S(q)\eta \right] = S^T B(q)\tau \quad (2.25)$$

Hay

$$S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q) \left[ M(q)\dot{S}(q) + V(q, \dot{q})S(q) \right] \eta = S^T B(q)\tau \quad (2.26)$$

Đặt

$$\bar{M}(q) = S^T(q)M(q)S(q)$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = S^T(q) \left[ M(q)\dot{S}(q) + V(q, \dot{q})S(q) \right]$$

$$\bar{B}(q) = S^T B(q)$$

Khi đó phương trình trở thành

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \quad (2.27)$$

Với các ma trận:

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{r^2}{4l^2}(ml^2 + I) & \frac{r^2}{4l^2}(ml^2 - I) \\ \frac{r^2}{4l^2}(ml^2 - I) & I_w + \frac{r^2}{4l^2}(ml^2 + I) \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r^2}{2l^2}m_c d\dot{\theta} \\ -\frac{r^2}{2l}m_c d\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Từ (2.6) (2.22) có thể quy đổi về vận tốc dài, vận tốc góc:

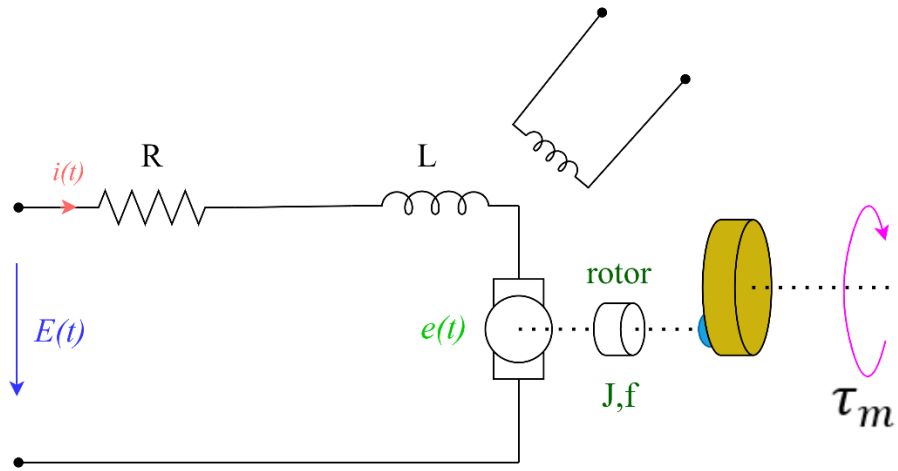


$$\eta = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{l}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{l}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Khi đó phương trình (2.27) cũng có thể viết lại dưới dạng:

$$\begin{cases} \left( m + \frac{2I_w}{r^2} \right) \dot{v} - m_c d \omega^2 = \frac{1}{r} (\tau_R + \tau_L) \\ \left( I + \frac{2l^2}{r^2} I_w \right) \dot{\omega} + m_c d \omega v = \frac{l}{r} (\tau_R - \tau_L) \end{cases} \quad (2.29)$$

## 2.4 Mô hình hóa cơ cấu chấp hành



Hình 2.3 Sơ đồ động cơ một chiều

Ta xây dựng mô hình động cơ một chiều [1], từ hình 2.3 theo định luật Kirchhoff ta có:

$$E(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad \text{Với } e(t) = K_e \omega_m \quad (2.30)$$

Phương trình truyền động của hệ:

$$\tau_m = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + f \omega_m(t) + K_m i(t) \quad \text{Với } \tau = N \tau_m \quad (2.31)$$

Từ (2.30), biến đổi laplace 2 vế ta được:

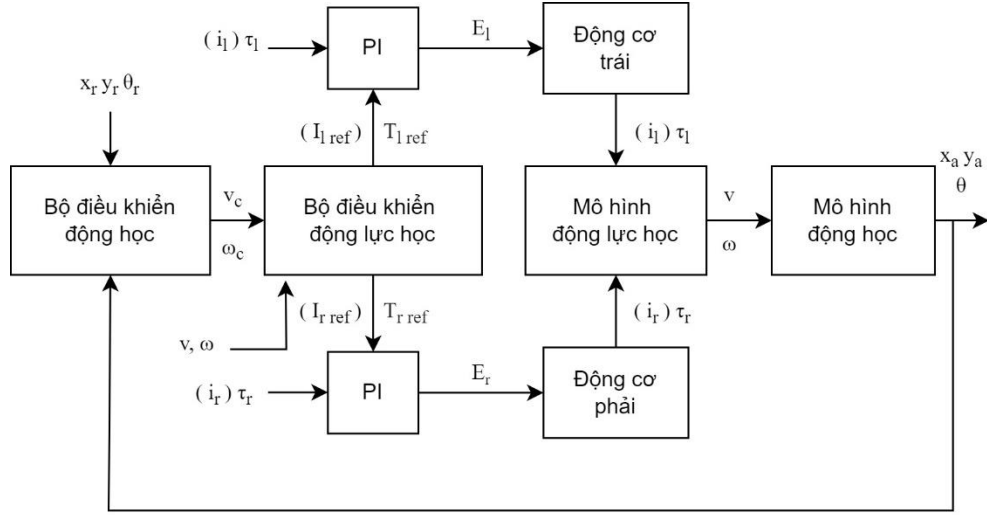
$$\frac{1}{(Ls + R)} (E - K_e N \dot{\phi}) = i \quad (2.32)$$

Khi đó (2.32) là mô hình động lực học của cơ cấu chấp hành.

Theo công thức (2.29) (2.32) ta có thể xây dựng các bộ điều khiển cho mô hình xe tự hành.

### CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Để mô tả hệ kín của hệ thống, ta có sơ đồ khối sau:



Hình 3.1 Sơ đồ khối mô hình hệ kín

Từ mô hình động học, động lực học, động cơ, ta thiết kế bộ điều khiển động học, bộ điều khiển động lực học, và bộ điều khiển động cơ. Tín hiệu vị trí từ mô hình động học đo được từ cảm biến là thông tin đầu vào của bộ điều khiển động học. Khi đó ta xây dựng các mô hình sai lệch để tính toán giá trị điều khiển. Giá trị điều khiển tính toán được là điện áp đặt vào hai động cơ, giá trị điều khiển dòng tính được từ bộ điều khiển động lực học và dòng phản hồi về từ động cơ. Giá trị vận tốc dài và vận tốc góc điều khiển được tính toán từ bộ điều khiển động học.

#### 3.1 Bộ điều khiển động lực học

##### 3.1.1 Xây dựng bộ điều khiển phản hồi trạng thái

Từ (2.29) ta xây dựng mô hình sai lệch động lực học như sau [14]:

$$\dot{e}_d + K_d e_d = \Theta \quad (3.1)$$

Với  $e_d = \begin{bmatrix} v_c - v \\ \omega_c - \omega \end{bmatrix}$ , và  $K_d = \text{diag}(K_v, K_\omega)$ ,  $K_v > 0, K_\omega > 0$  thì  $e_d$  ổn định

tiệm cận tại gốc tọa độ.

Đặt  $s_1 = \tau_R + \tau_L$ ,  $s_2 = \tau_R - \tau_L$ , tại (3.1) (2.26) ta có:

$$\begin{cases} \dot{v}_c - \left[ m_c d \omega^2 + \frac{s_1}{r} \right] \frac{1}{m + \frac{2I_\omega}{r^2}} + K_v (v_c - v) = 0 \\ \dot{\omega}_c - \left[ -m_c d \omega v + \frac{l}{r} s_2 \right] \frac{1}{I + \frac{2l^2}{r^2} I_\omega} + K_\omega (\omega_c - \omega) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} s_1 = r \left[ \left( \dot{v}_c + K_v(v_c - v) \right) \left( m + \frac{2I_\omega}{r^2} \right) - m_c d \omega^2 \right] \\ s_2 = \frac{r}{l} \left[ \left( \dot{\omega}_c + K_\omega(\omega_c - \omega) \right) \left( I + \frac{2l^2 I_\omega}{r^2} \right) + m_c d \omega v \right] \end{cases}$$

Với  $K_v = K_\omega = 25$

Khi đó ta tính được bộ điều khiển cho (2.29):

$$\Rightarrow \begin{cases} \tau_R = \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \tau_L = \frac{s_1 - s_2}{2} \end{cases}$$

### 3.1.2 Xây dựng bộ điều khiển trượt

Để xây dựng được bộ điều khiển trượt ta phải chọn mặt trượt sao cho  $s \rightarrow 0$  khi  $t \rightarrow \infty$  [11]. Chọn mặt trượt cho đối tượng tích phân bậc 1:

$$\begin{cases} s_v = C_v e_v \\ s_w = C_w e_w \end{cases} \quad (3.2)$$

Đạo hàm theo thời gian phương trình trên ta được:

$$\begin{cases} \dot{s}_v = C_v \dot{e}_v \\ \dot{s}_w = C_w \dot{e}_w \end{cases} \quad (3.3)$$

Với  $C_v, C_w > 0$

Xét hàm Lyapunov:

$$V(s) = \frac{1}{2} s^T s, \quad s = \begin{bmatrix} s_v \\ s_w \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Trong đó  $V(s) \geq 0, \forall s \neq \Theta$  và  $V(s) = \Theta$  khi  $s = \Theta$

Đạo hàm theo thời gian:

$$\frac{dV}{dt} = s^T \cdot \dot{s} = s_v C_v \dot{e}_v + s_w C_w \dot{e}_w$$

Đặt  $s_1 = \tau_R + \tau_L$ ,  $s_2 = \tau_R - \tau_L$ , chọn tín hiệu điều khiển như sau:

$$\begin{cases} s_1 = r \cdot \left[ \left( m + \frac{2I_w}{r^2} \right) \dot{v}_c - m_c d \omega + k_v \text{sign}(s_v) \right] \\ s_2 = \frac{r}{l} \cdot \left[ \left( I + \frac{2l^2}{r^2} I_w \right) \dot{\omega}_c + m_c d \omega v + k_w \text{sign}(s_w) \right] \end{cases} \quad (3.5)$$

Chọn  $k_v = k_w = 470, C_v = C_w = 7$

Trong đó hàm dấu:  $sign(s_i) = \begin{cases} 1, s_i > 0 \\ 0, s_i = 0 \\ -1, s_i < 0 \end{cases}$

Suy ra

$$\frac{dV}{dt} = -k_v s_v sign(s_v) - k_w s_w sign(s_w) \leq 0, \quad \forall s_v, s_w$$

Khi đó ta tính được bộ điều khiển cho (2.29):

$$\Rightarrow \begin{cases} \tau_R = \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \tau_L = \frac{s_1 - s_2}{2} \end{cases}$$

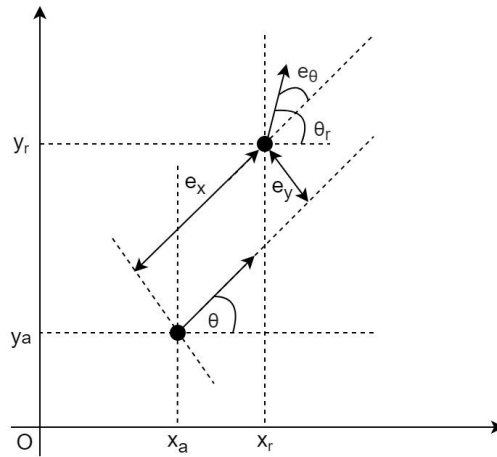
Ở công thức (3.5) có thể thay thế hàm dấu bằng hàm bão hòa để có thể giảm hiện tượng chattering:

$$sat(s_i) = \begin{cases} 1, s_i > 1 \\ s_i, -1 \leq s_i \leq 1 \\ -1, s_i < -1 \end{cases}$$

### 3.2 Bộ điều khiển bám quỹ đạo

Từ (2.22) (2.28) ta có mô hình động học của hệ:

$$\begin{cases} \dot{x}_a = v \cos \theta \\ \dot{y}_a = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (3.6)$$



Hình 3.2 Các biến sai lệch trạng thái của hệ vật

Từ hình 3.4 ta định nghĩa các trạng thái sai lệch của hệ vật như sau [2]:

$$e_p = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_a \\ y_r - y_a \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Đạo hàm (3.7) ta được:

$$\begin{aligned}
& \begin{cases} \dot{e}_x = (\dot{x}_r - \dot{x}_a) \cos \theta + (\dot{y}_r - \dot{y}_a) \sin \theta - (x_r - x_a) \dot{\theta} \sin \theta + (y_r - y_a) \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{e}_y = -(\dot{x}_r - \dot{x}_a) \sin \theta + (\dot{y}_r - \dot{y}_a) \cos \theta - (x_r - x_a) \dot{\theta} \cos \theta - (y_r - y_a) \dot{\theta} \sin \theta \\ \dot{e}_\theta = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} \end{cases} \\
\Rightarrow & \begin{cases} \dot{e}_x = \dot{x}_r \cos(\theta_r - e_\theta) + \dot{y}_r \sin(\theta_r - e_\theta) - v + e_y \omega \\ \dot{e}_y = -\dot{x}_r \sin(\theta_r - e_\theta) + \dot{y}_r \cos(\theta_r - e_\theta) - e_x \omega \\ \dot{e}_\theta = \omega_r - \omega \end{cases} \\
\Rightarrow & \begin{cases} \dot{e}_x = v_r \cos e_\theta - v + e_y \omega \\ \dot{e}_y = v_r \sin e_\theta - e_x \omega \\ \dot{e}_\theta = \omega_r - \omega \end{cases} \quad (3.8)
\end{aligned}$$

Trong đó các biến:

$$\begin{cases} v_r = \sqrt{\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2} \\ \omega_r = \frac{\dot{x}_r \ddot{y}_r - \dot{y}_r \ddot{x}_r}{\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2} \end{cases} \quad (3.9)$$

Xét hàm Lyapunov:

$$V(e_p) = \frac{1}{2}(e_x^2 + e_y^2) + \frac{1 - \cos e_\theta}{K_y} \geq 0 \quad \forall e_p \neq \Theta \quad \text{và} \quad V(e_p) = 0 \quad \text{khi} \quad e_p = \Theta$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \frac{dV}{dt} &= (\text{grad} V)^T \frac{de_p}{dt} = \begin{bmatrix} e_x & e_y & \frac{\sin e_\theta}{K_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta - v + e_y \omega \\ v_r \sin e_\theta - e_x \omega \\ \dot{\theta}_r - \dot{\theta} \end{bmatrix} \\
&= e_x (v_r \cos e_\theta - v + e_y \omega) + e_y (v_r \sin e_\theta - e_x \omega) + \frac{\sin e_\theta}{K_y} (\omega_r - \omega)
\end{aligned}$$

Chọn tín hiệu điều khiển [12]:

$$\begin{cases} v_c = v_r \cos \theta_e + K_x x_e \\ \omega_c = \omega_r + v_r (K_y y_e + K_\theta \sin \theta_e) \end{cases} \quad (3.10)$$

Khi đó

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= e_x \left( e_y \left( \omega_r + v_r + (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta) \right) - K_x e_x \right) + \\ &\quad e_y \left( -e_x \left( \omega_r + v_r + (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta) \right) + v_r \sin e_\theta \right) + \\ &\quad \frac{-v_r (K_y e_y + K_\theta \sin e_\theta)}{K_y} \sin e_\theta \\ &= K_x x_e^2 - \frac{v_r K_\theta \sin^2 e_\theta}{K_y} \leq 0, \quad \forall e_p\end{aligned}$$

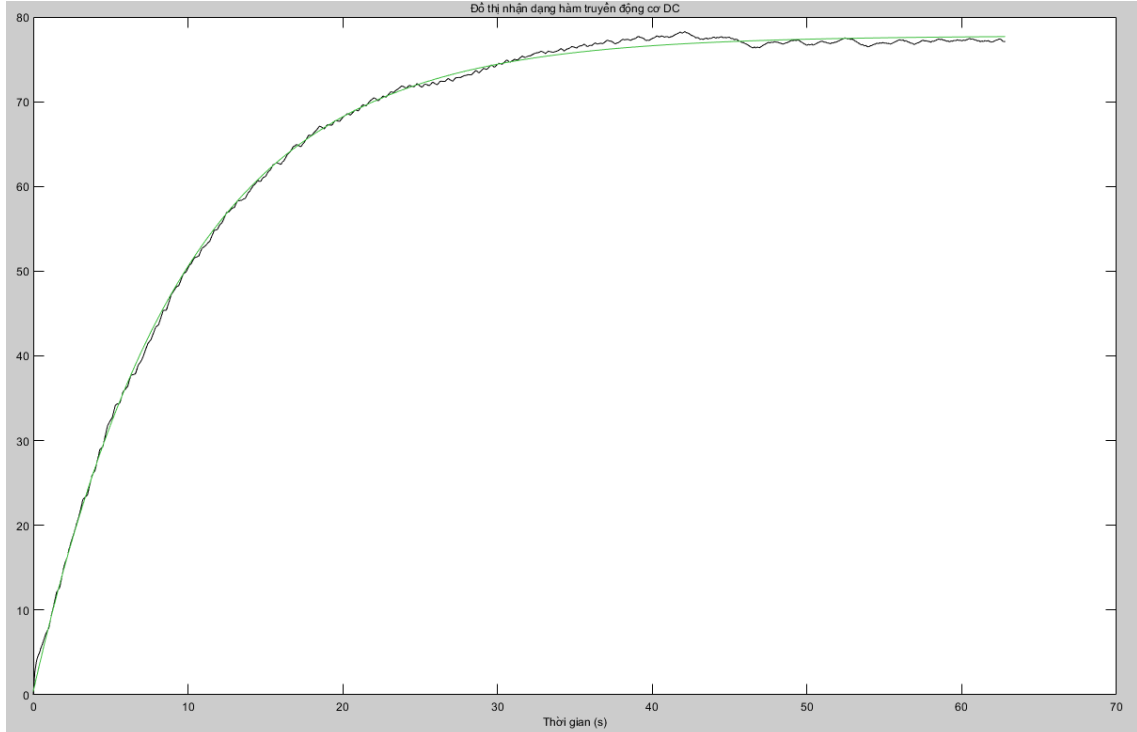
Khi đó hệ ổn định tiệm cận tại gốc tọa độ. Chọn tham số bộ điều khiển như sau [6]:  $K_x = K_{\phi} = 5$ ,  $K_y = 60$

### 3.3 Bộ điều khiển cho hệ cơ cấu chấp hành

#### 3.3.1 Nhận dạng mô hình dòng động cơ

**Phương pháp:** đặt đầu vào động cơ một điện áp cố định (tín hiệu bước nhảy) và đo đáp ứng đầu ra (đáp ứng dòng) của động cơ. Từ những số liệu thu được, ta sử dụng khối *Identification Toolbox* của Matlab để nhận dạng mô hình dòng động cơ.

Dễ dàng nhận thấy mô hình dòng điện của động cơ DC có dạng quán tính bậc nhất.



Hình 3.3 Đồ thị nhận dạng hàm truyền động cơ DC

Từ mô hình ta có tham số của mô hình dòng của động cơ:

$$S(s) = \frac{k}{1+Ts} \text{ với } \begin{cases} k = 15,558 \\ T = 9,5679 \\ \text{Độ chính xác: 96,95\%} \end{cases} \quad (3.11)$$

### 3.3.2 Thiết kế bộ điều khiển dòng và mô hình

Từ mô hình đối tượng dòng động cơ (3.11)  $k = 15,558$ ,  $T = 9,5679$ , ta tiến hành thiết kế bộ điều khiển.

#### - Phương pháp gán độ quá điều chỉnh và thời gian xác lập (OSA)

Xét đối tượng (2.32) ở dạng quán tính bậc nhất:

$$S(s) = \frac{k}{1+Ts} \quad (3.12)$$

Bộ điều khiển là khâu tích phân:

$$R(s) = k_p + \frac{k_p}{T_i s} \quad (3.13)$$

Từ (3.12), (3.13) ta có hàm truyền hệ kín:

$$G(s) = \frac{R(s)S(s)}{1+R(s)S(s)} = \frac{1+T_i s}{\left(T_i T / (k_p k)\right)s^2 + T_i 1 + \left(1 + \left(1 / (k_p k)\right)\right)s + 1} \quad (3.14)$$

Khi đó [10]:

$$\begin{cases} T_i = T \\ k_p = \frac{T \ln(a/100)}{kT_{a\%}} \end{cases} \quad (3.15)$$

Chọn thời gian xác lập  $T_{2\%} = 100ms$ . Tính toán ta thu được bộ tham số của bộ điều khiển PI:  $k_p = 24,0575$  và  $k_i = 2,5144$

#### - Phương pháp giải thuật di truyền (GA)

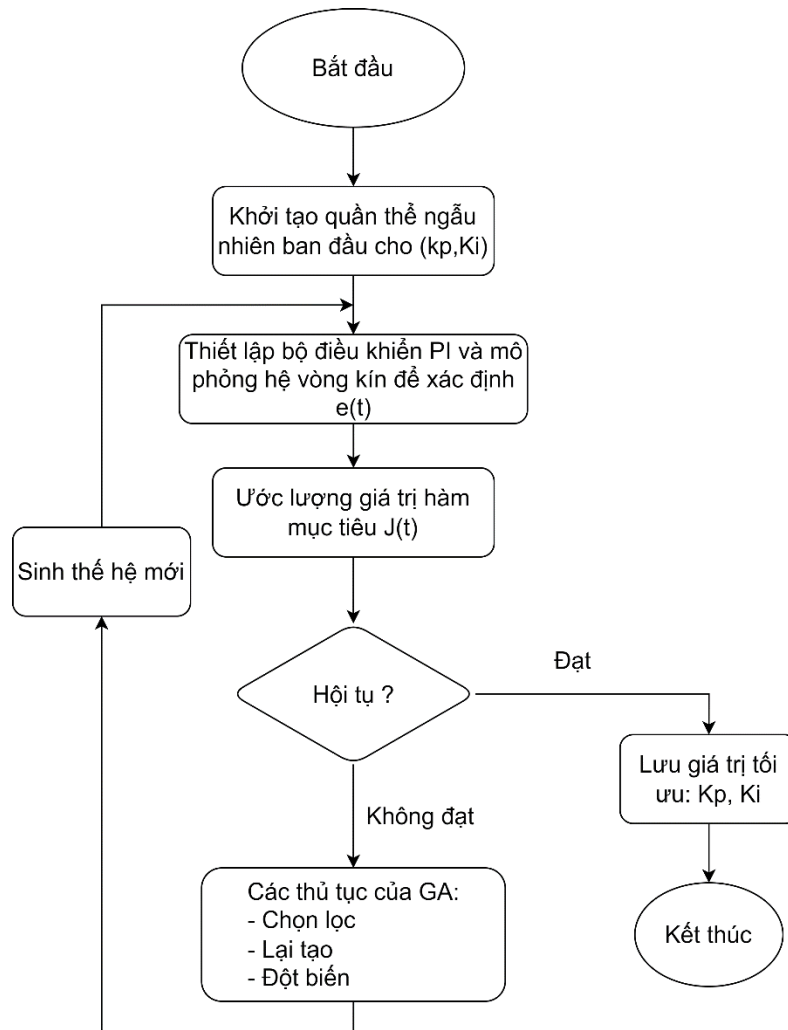
Trong hệ điều khiển vòng kín,  $e(t)$  là sai biệt giữa giá trị đặt và giá trị đáp ứng của hệ thống. Từ đó hàm mục tiêu của quá trình tinh chỉnh bộ điều khiển là:

$$J(t) = \int_0^{T_f} t |e(t)| dt$$

Nhiệm vụ của giải thuật GA là tìm kiếm các giá trị tối ưu của bộ điều khiển (trong bài ta sử dụng bộ điều khiển PI), mà ở đó hàm  $J(t)$  đạt giá trị cực tiểu. Nói cách khác, hàm mục tiêu của giải thuật di truyền GA là [9]:

$$\min \{J(t)\}$$

Giải thuật GA được hỗ trợ bởi Matlab và được trình bày chi tiết trong The Mathworks Inc.2007. Các tham số của giải thuật GA được lựa chọn như sau: quá trình tiến hóa qua 50 thế hệ (generations = 50); kích thước quần thể 20 (population size = 20); xác suất đột biến được điều chỉnh thích nghi trong khoảng thời gian từ 0,001 đến 0,01.



Hình 3.4 Lưu đồ thuật toán giải thuật di truyền GA

Ta thu được tham số bộ điều khiển PI là: 
$$\begin{cases} K_p = 15,9938 \\ K_i = 3,3554 \\ J = 0,0249 \end{cases}$$

#### - Phương pháp điều khiển mờ tỉ lệ:

Bộ điều khiển mờ được thiết kế theo mô hình mờ Mamdani như sau [7]:



Hình 3.5 Mô hình mờ Mamdani

Ở mô hình mờ, ta cần biết thông tin của tập dữ liệu đầu vào, ra. Khối mờ hóa đầu vào ra được xây dựng từ các hàm liên thuộc tương ứng với các giá trị biến ngôn ngữ X, Y. Dữ liệu x, y phải nằm trong một khoảng cho trước. Hàm liên thuộc được chọn có thể là hàm tam giác, hàm hình thang, gauss, sigmoid, ...



Từ biến ngôn ngữ ta xây dựng mệnh đề NẾU-THÌ:

R: *Nếu X là A thì Y là B.*

Trong đó: A, B là các giá trị của biến x, y

X, Y là biến ngôn ngữ.

R là tên mệnh đề.

Mệnh đề Nếu-thì có hai phần, “*Nếu X là A*” là điều kiện mệnh đề, “*Thì Y là B*” là kết quả mệnh đề. Sau khi có đầu vào, ta có thể suy luận dựa ra kết quả như sau:

$$\mu_R(x, y) = f(\mu_A(x); \mu_B(y)) \quad (3.16)$$

Trong đó:  $f$  là hàm suy luận

$\mu_R$  là kết quả mệnh đề

$\mu_A, \mu_B$  là các hàm liên thuộc của tập giá trị A, B

Trong hệ mờ ta có thể xây dựng nhiều mệnh đề Nếu-Thì như sau:

$R_1$ : Nếu X là  $A_1$  thì Y là  $B_1$  hoặc

$R_2$ : Nếu X là  $A_2$  thì Y là  $B_2$  hoặc

$R_n$ : Nếu X là  $A_n$  thì Y là  $B_n$ .

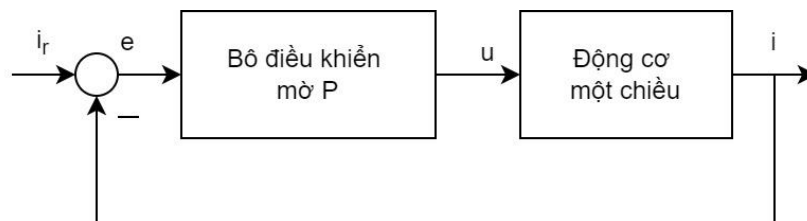
Nếu trong hệ mờ xây dựng nhiều mệnh đề thì kết quả mệnh đề mờ được xây dựng từ luật hợp thành:

$$\mu_R(x, y) = \bigcup_{i=1}^n \mu_{R_i}(x, y) \quad (3.17)$$

Để giải mờ từ luật hợp thành ta dùng phương pháp điểm trọng tâm:

$$y' = \frac{\int_S y \mu_R(y) dy}{\int_S \mu_R(y) dy} \quad (3.18)$$

Trong đó  $S = \{y \in Y \mid \mu_R(y) > 0\}$



Hình 3.6 Mô hình bộ điều khiển Mờ P

Chọn tín hiệu đầu vào thỏa mãn điều kiện:

$$E_{\min} \leq e \leq E_{\max} \quad (3.19)$$

Chọn tín hiệu đầu ra điều khiển:

$$i_{\min} \leq i \leq i_{\max} \quad (3.20)$$

Khi đó dải đầu vào của hệ mờ:  $U = [-\delta; \delta]$  với  $\delta = i_{\max} - i_{\min}$

$$U = [-50; 50] \quad (3.21)$$

Dải đầu ra của hệ mờ:  $Y = [-\lambda; \lambda]$  với  $\lambda = E_{\max}$

$$Y = [-70; 70] \quad (3.22)$$

Chọn hàm liên thuộc dạng tam giác.

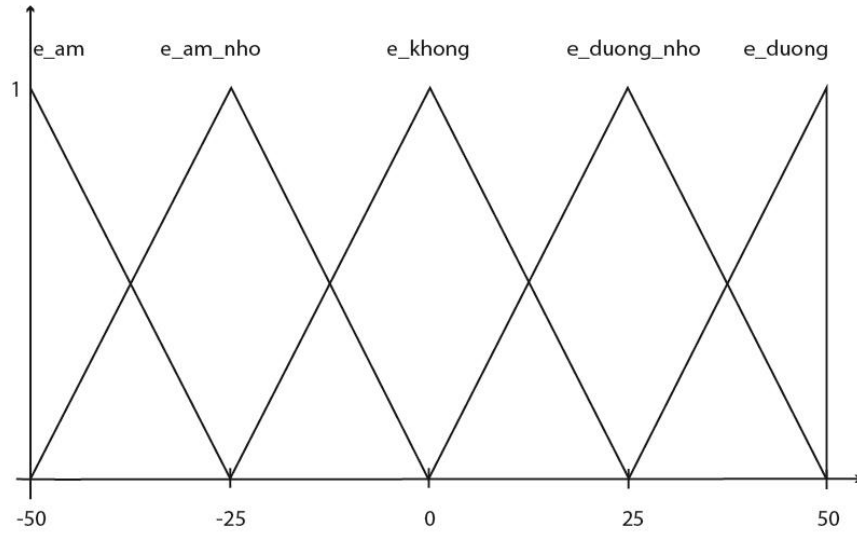
Tên biến ngôn ngữ đầu vào: sai lệch.

Tên biến ngôn ngữ đầu ra: tín hiệu điều khiển.

Giá trị của biến ngôn ngữ: âm, âm nhỏ, không, dương nhỏ, dương.

Các hàm liên thuộc đầu vào có dạng:

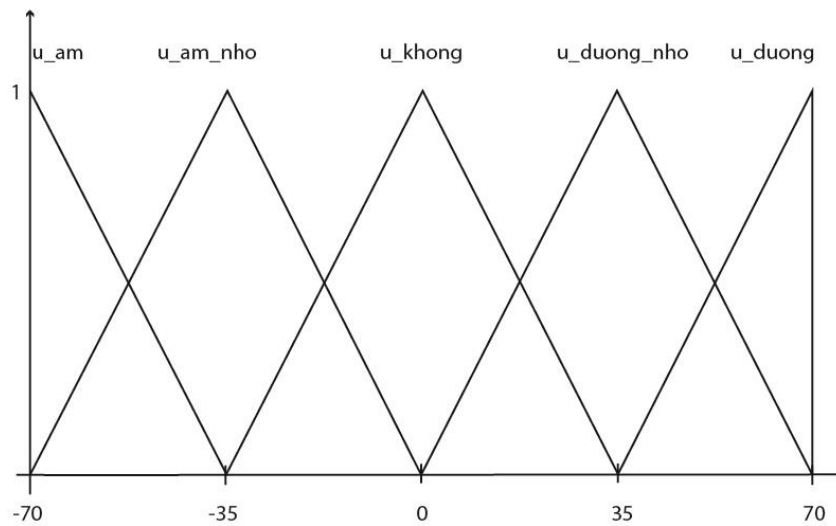
$$\begin{aligned} \mu_{e\_am}(e) &= \text{trimf}(e, [-50; -50; 25]) \\ \mu_{e\_am\_nho}(e) &= \text{trimf}(e, [-50; -25; 0]) \\ \mu_{e\_khong}(e) &= \text{trimf}(e, [-25; 0; 25]) \\ \mu_{e\_duong}(e) &= \text{trimf}(e, [0; 25; 50]) \\ \mu_{e\_duong\_nho}(e) &= \text{trimf}(e, [25; 50; 50]) \end{aligned} \quad (3.23)$$



Hình 3.7 Các tập mờ đầu vào của bộ điều khiển

Các hàm liên thuộc đầu ra sẽ có dạng:

$$\begin{aligned} \mu_{u\_am}(u) &= \text{trimf}(u, [-70; -70; 0]) \\ \mu_{u\_am\_nho}(u) &= \text{trimf}(u, [-70; -35; 0]) \\ \mu_{u\_khong}(u) &= \text{trimf}(u, [-35; 0; 35]) \\ \mu_{u\_duong\_nho}(u) &= \text{trimf}(u, [0; 35; 70]) \\ \mu_{u\_duong}(u) &= \text{trimf}(u, [35; 70; 70]) \end{aligned} \quad (3.24)$$



Hình 3.8 Các tập mờ đầu ra của bộ điều khiển

Chọn mô hình mờ Mamdani, thiết lập các mệnh đề hợp thành như sau:

R<sub>1</sub>: Nếu sai lệch là  $e_{am}$  thì tín hiệu điều khiển là  $u_{am}$

hoặc

R<sub>2</sub>: Nếu sai lệch là  $e_{am\_nho}$  thì tín hiệu điều khiển là  $u_{am\_nho}$

hoặc

R<sub>3</sub>: Nếu sai lệch là  $e_{khong}$  thì tín hiệu điều khiển là  $u_{khong}$

hoặc

R<sub>4</sub>: Nếu sai lệch là  $e_{duong\_nho}$  thì tín hiệu điều khiển là  $u_{duong\_nho}$

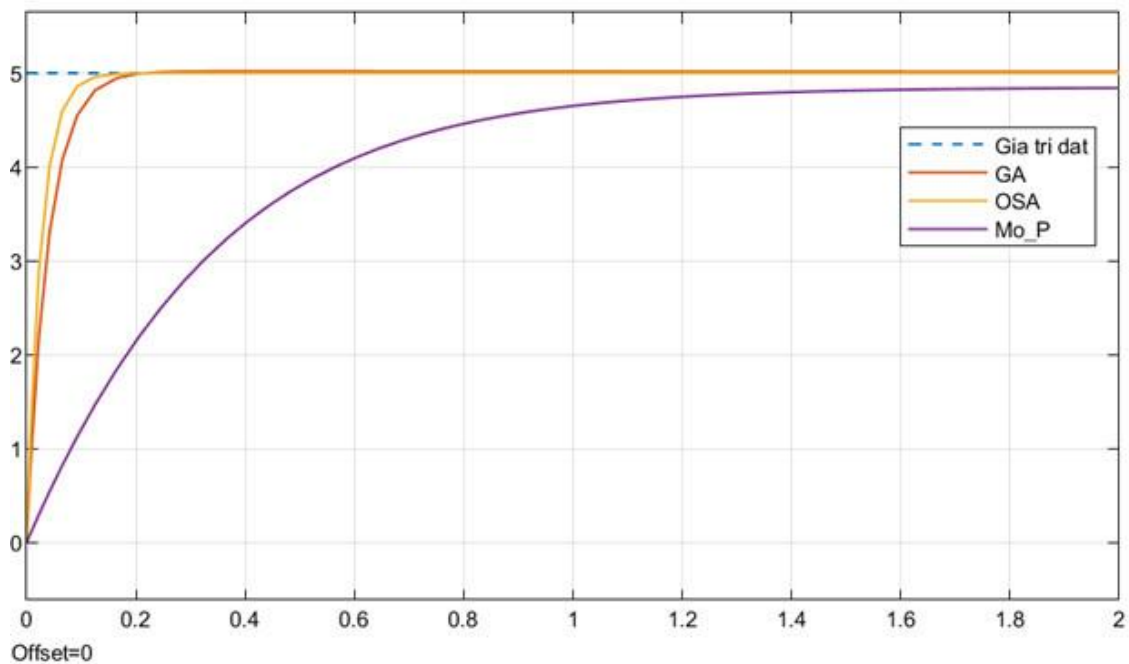
hoặc

R<sub>5</sub>: Nếu sai lệch là  $e_{duong}$  thì tín hiệu điều khiển là  $u_{duong}$ .

Sử dụng phương pháp điểm trọng tâm để giải mờ.

### 3.3.3 Kết quả mô phỏng của các bộ điều khiển

Hình 3.13 là kết quả mô phỏng đáp ứng dòng của động cơ một chiều với giá trị đặt của điện áp là 5V.



Hình 3.9 Tín hiệu đáp ứng dòng của động cơ một chiều

Bộ điều khiển gán độ quá điều chỉnh và thời gian xác lập cho kết quả tốt nhất với thời gian xác lập 0,1s và không có độ quá điều chỉnh.

Bộ điều khiển giải thuật di truyền: Thời gian xác lập 0,2s. Không có độ quá điều chỉnh.

Bộ điều khiển Mờ tỉ lệ: đáp ứng chậm hơn so với hai bộ điều khiển trên.

Qua đây, chúng em đã xây dựng được các bộ điều khiển:

- Bộ điều khiển động học.
- Bộ điều khiển động lực học: Bộ điều khiển phản hồi trạng thái, bộ điều khiển trượt.
- Bộ điều khiển dòng: Bộ điều khiển OSA, Bộ điều khiển giải thuật di truyền, bộ điều khiển mờ tỉ lệ

## CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

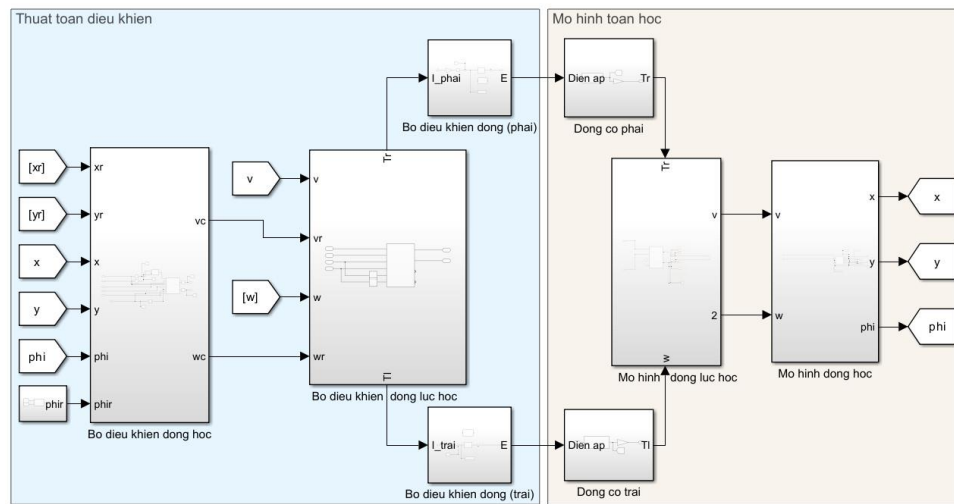
Sau khi thiết kế riêng rẽ các bộ điều khiển cho từng mô hình, chúng em gộp lại các bộ điều khiển để kiểm tra đối tượng xe tự hành có khả năng bám với quỹ đạo đặt ra là hình tròn hay không. Simulink là công cụ để kiểm chứng thuật toán này. Thông số mô hình xe tự hành được cho như bảng sau [8]:

*Bảng 1 Thông số mô hình xe tự hành*

<b>Ký hiệu</b>	<b>Tham số</b>	<b>Giá trị</b>
$m_c$	Khối lượng thân xe	30 kg
$m_w$	Khối lượng bánh xe	1 kg
$d$	Khoảng cách tâm xe đến trục hai bánh xe	0.3 m
$r$	Bán kính bánh xe	0.15 m
$l$	Khoảng cách trung điểm bánh xe đến bánh xe	0.375 m
$I_w$	Momen quán tính bánh xe	0.005 kg.m <sup>2</sup>
$I_m$	Momen quán tính của bánh xe quanh trọng tâm xe	0.0025 kg.m <sup>2</sup>
$I_c$	Momen quán tính của thân xe	15.625 kg.m <sup>2</sup>
$K_m$	Hằng số momen xoắn	0.2613 N.m/A
$K_e$	Hằng số điện trường	0.19 rd/s
$N$	Tỉ số truyền động cơ	62.55

Quỹ đạo đặt xe tự hành là hình tròn có bán kính là 2m, tốc độ góc là 3.14/15 rad/s:

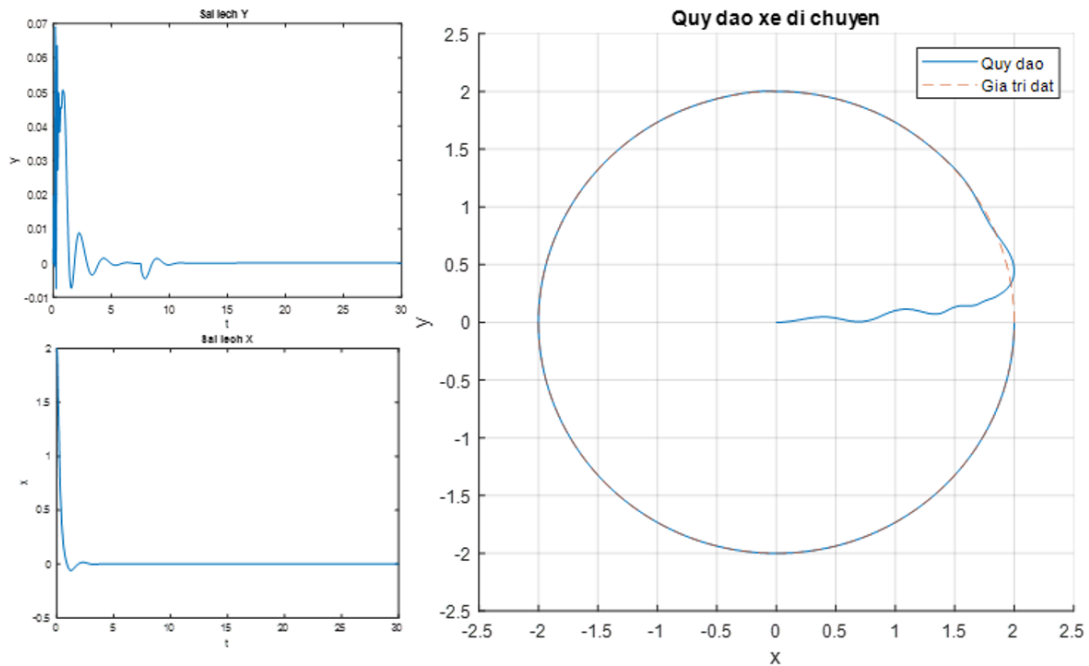
$$\begin{cases} x_r = 2 \cos\left(\frac{3.14}{15}t\right) \\ y_r = 2 \sin\left(\frac{3.14}{15}t\right) \end{cases}$$



Hình 4.1 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển bằng phần mềm Matlab

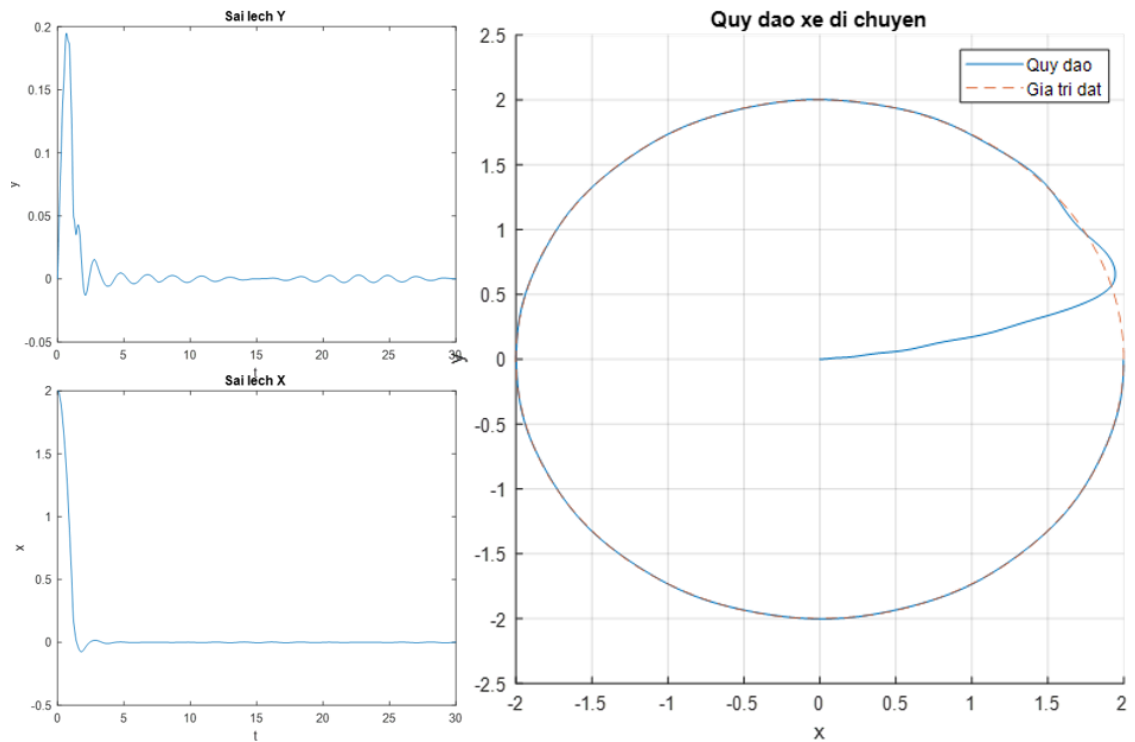
#### 4.1 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe

Bộ điều khiển phản hồi trạng thái – OSA



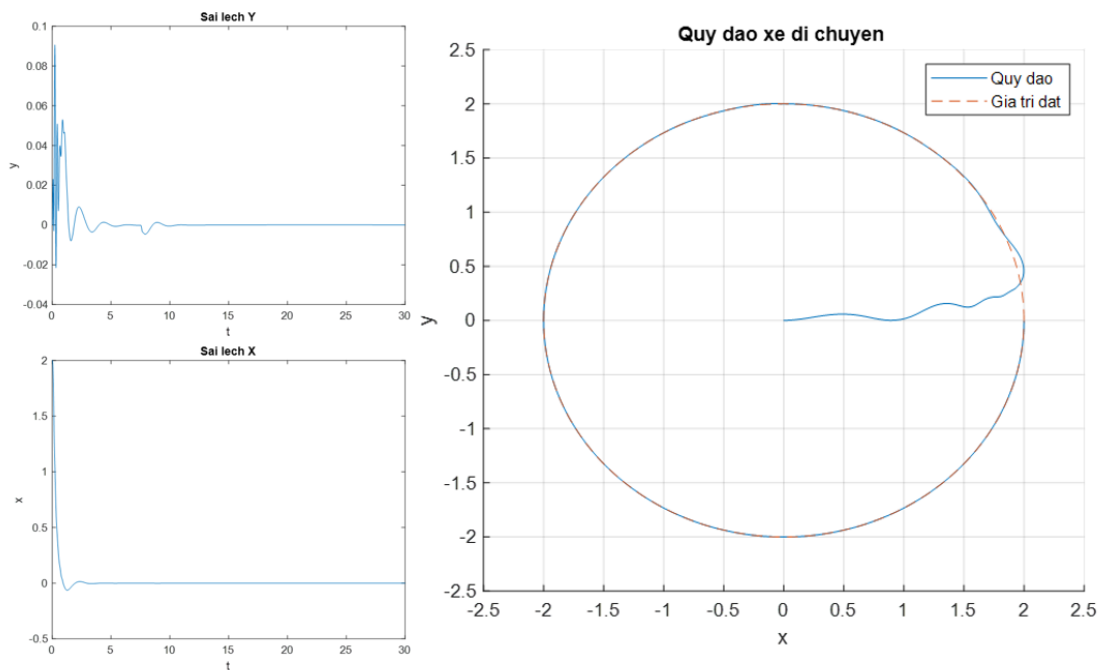
Hình 4.2 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển phản hồi trạng thái - OSA

## Bộ điều khiển trượt - OSA



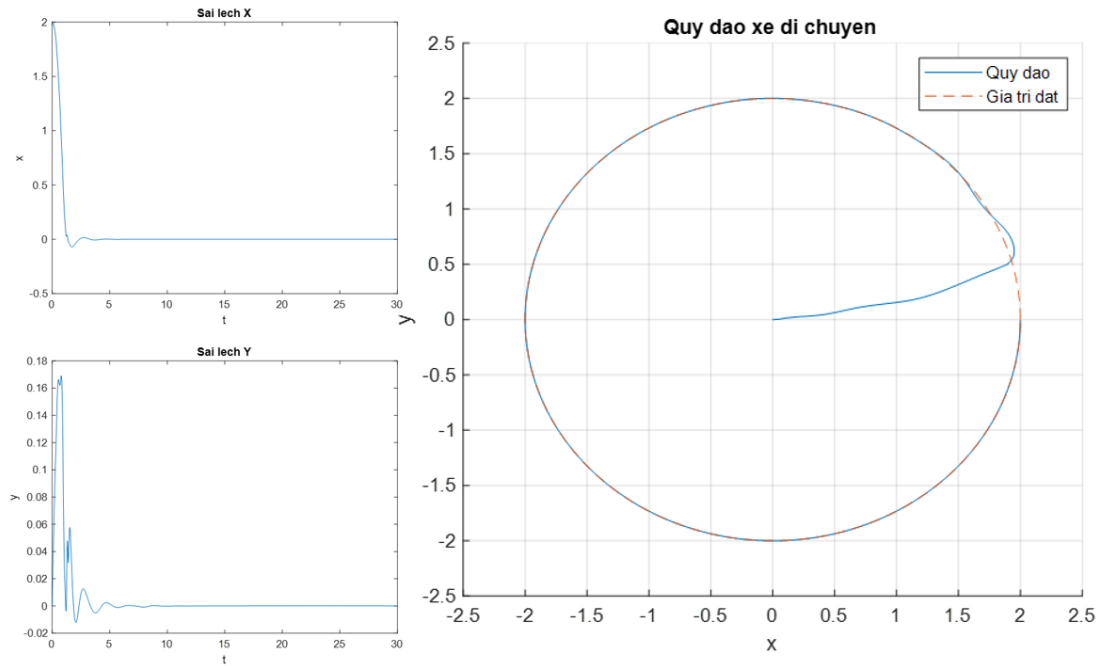
Hình 4.3 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển trượt - OSA

## Phản hồi trạng thái – GA



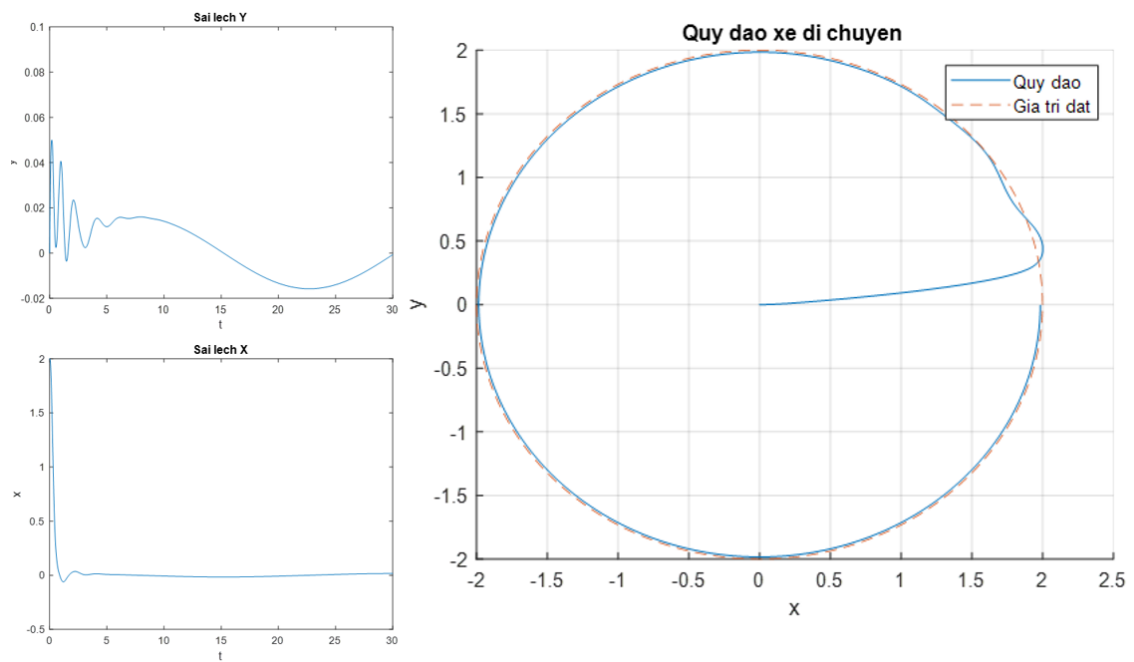
Hình 4.4 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển phản hồi trạng thái - GA

### Bộ điều khiển trượt – GA



Hình 4.5 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển trượt - GA

### Phản hồi trạng thái - mờ P

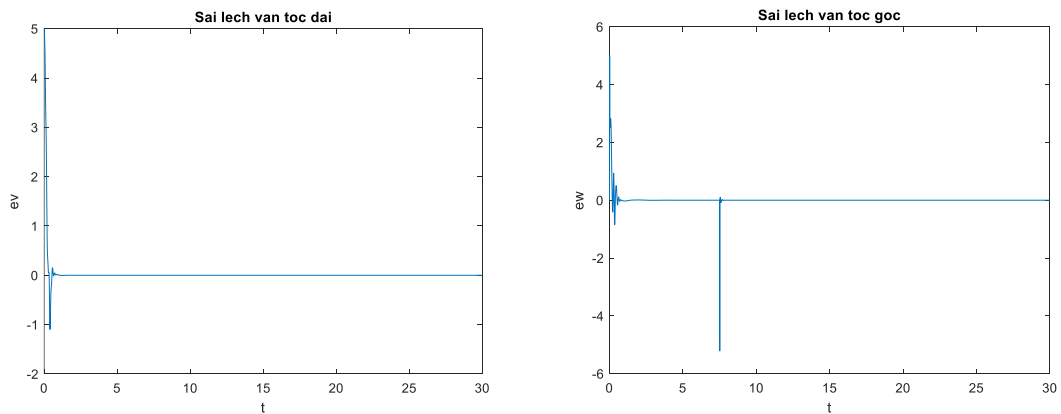


Hình 4.6 Sai lệch vị trí và quỹ đạo của xe trong bộ điều khiển phản hồi trạng thái – mờ P



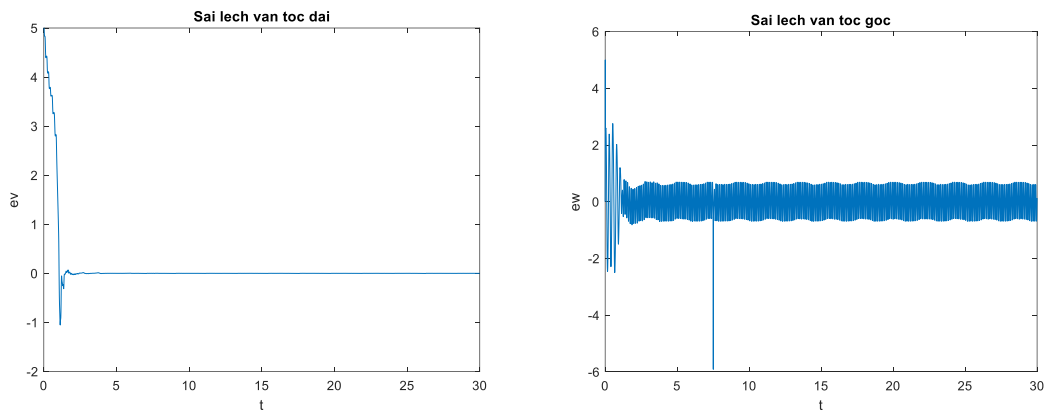
## 4.2 Tín hiệu sai lệch điều khiển vận tốc

### Phản hồi trạng thái – OSA



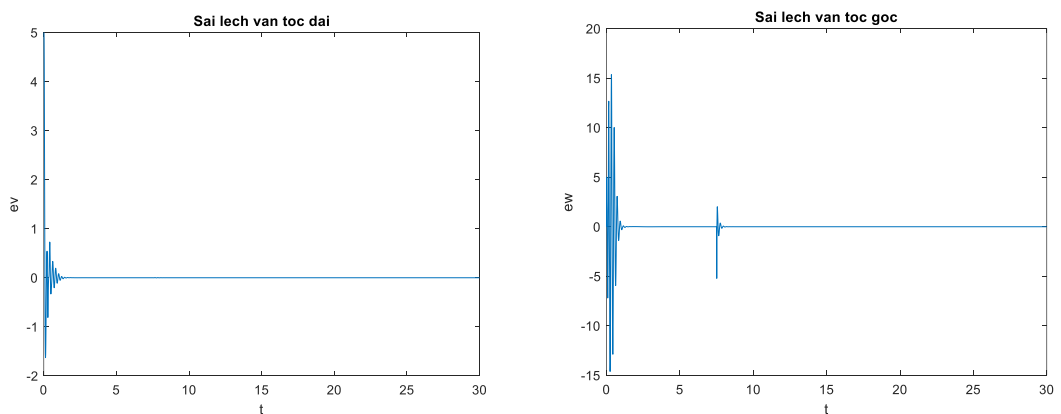
Hình 4.7 Sai lệch vận tốc dài và vận tốc góc phản hồi trạng thái – OSA

### Điều khiển trượt – OSA



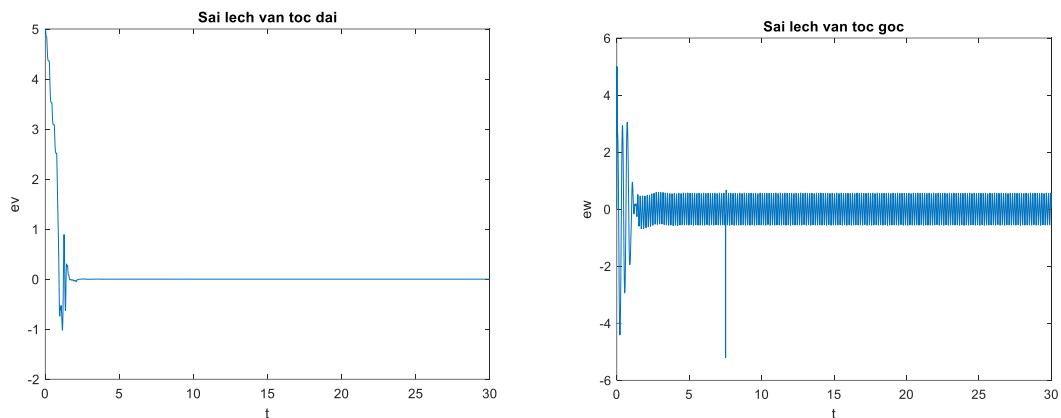
Hình 4.8 Sai lệch vận tốc dài và tốc độ góc bộ điều khiển trượt - OSA

### Phản hồi trạng thái - GA



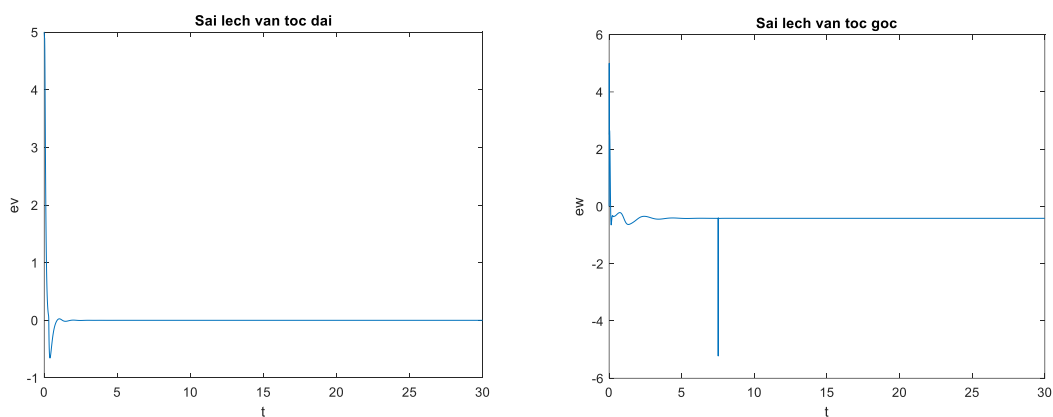
Hình 4.9 Sai lệch vận tốc dài và tốc độ góc bộ điều khiển phản hồi trạng thái - GA

## Bộ điều khiển trượt – GA



Hình 4.10 Sai lệch vận tốc dài và tốc độ góc bộ điều khiển trượt - GA

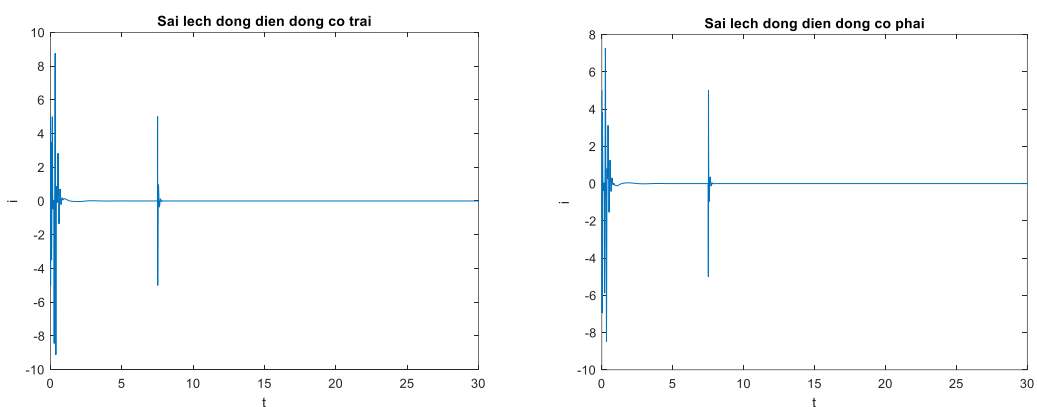
## Phản hồi trạng thái – mờ P



Hình 4.11 Sai lệch vận tốc dài và vận tốc góc phản hồi trạng thái – mờ P

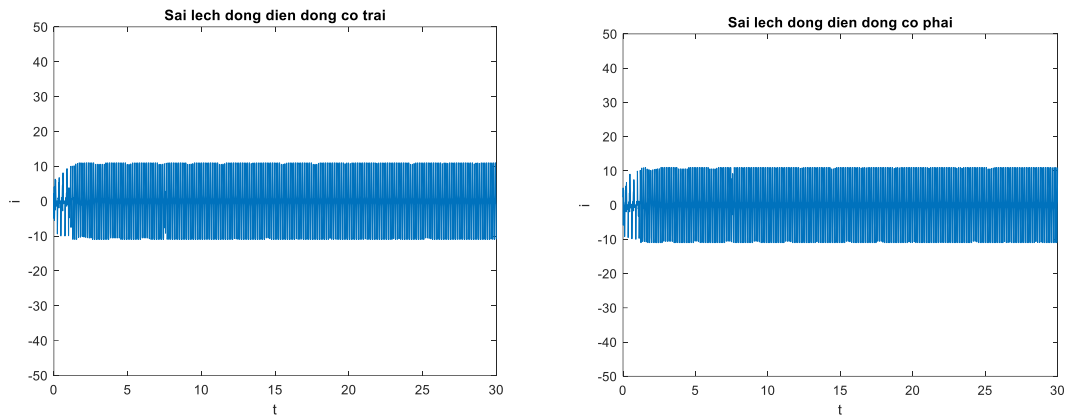
## 4.3 Tín hiệu điều khiển dòng điện

### Phản hồi trạng thái – OSA



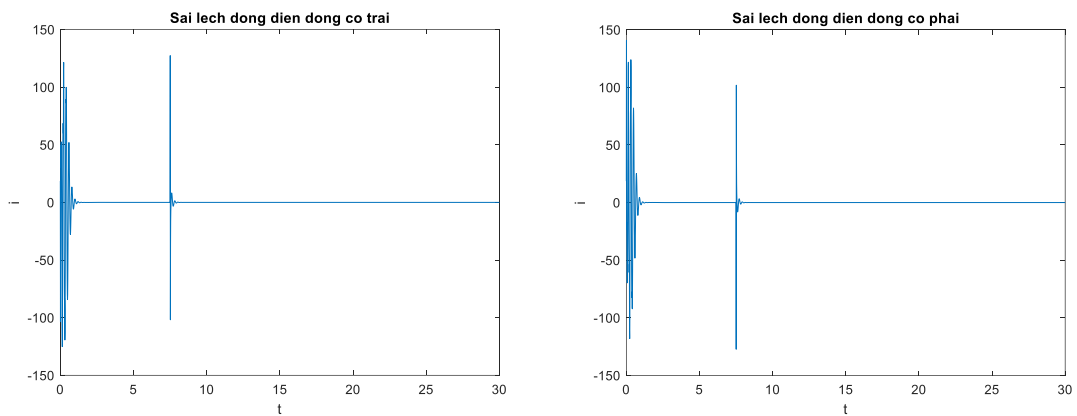
Hình 4.12 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải phản hồi trạng thái - OSA

### Điều khiển trượt - OSA



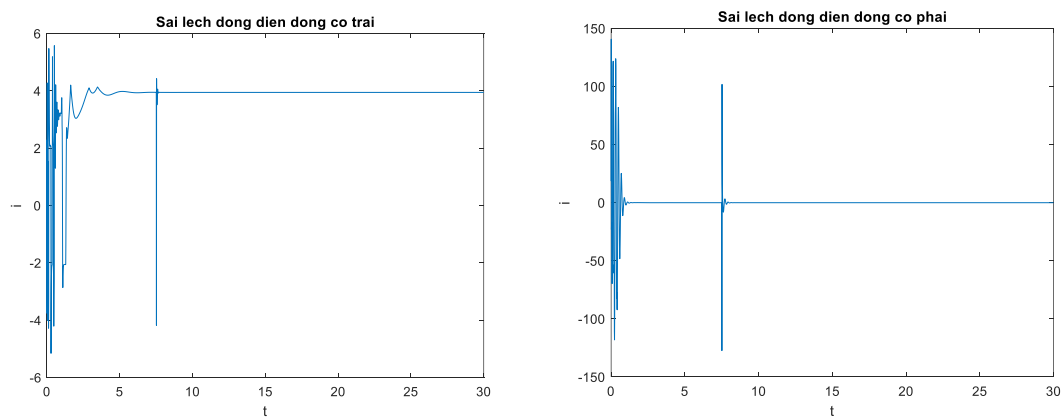
Hình 4.13 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải trượt - OSA

### Phản hồi trạng thái – GA



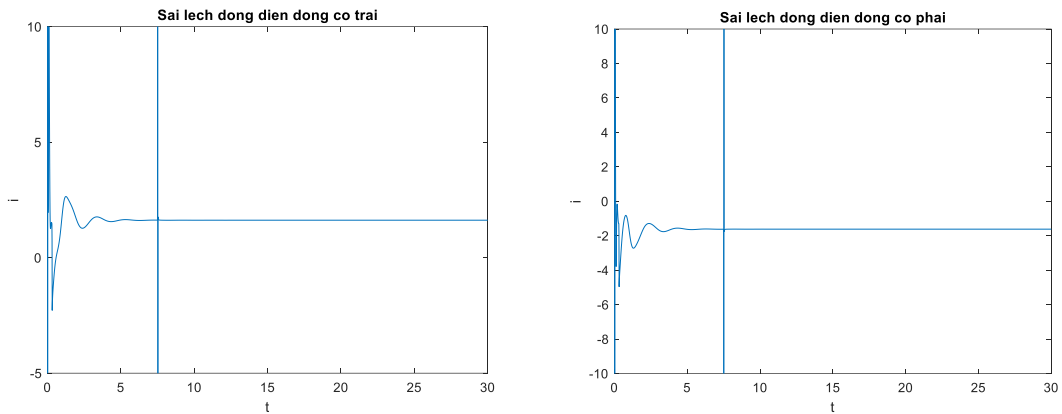
Hình 4.14 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải phản hồi trạng thái - GA

### Bộ điều khiển trượt – GA



Hình 4.15 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải trượt - GA

## Phản hồi trạng thái – mờ P



Hình 4.16 Sai lệch dòng điện phản ứng động cơ trái và phải phản hồi trạng thái – mờ P

### 4.4 Nhận xét

Qua hình 4.2-4.6 ta nhận xét thấy xe tự hành bám quỹ đạo đặt ra. Tuy nhiên ở bộ điều khiển trượt vẫn còn hiện tượng chattering. Hiện tượng chattering xảy ra khi quỹ đạo trạng thái tiến đến gần mặt trượt, điều này gây ảnh hưởng cho cơ cấu chấp hành. Thời gian để sai lệch trạng thái tiến đến không là 2-3 giây với cả bộ điều khiển trượt và bộ điều khiển phản hồi trạng thái và đạt yêu cầu so với bài toán đặt ra. Nhóm đã thực hiện bộ điều khiển dòng với phương pháp gán thời gian xác lập và kết quả thu được phù hợp với yêu cầu đặt ra. Tuy nhiên việc điều chỉnh tham số bộ điều khiển động học và động lực học vẫn còn dựa trên kinh nghiệm mô phỏng mà chưa có tiêu chuẩn để có thể tối ưu chất lượng điều khiển cũng như là khả năng ứng dụng vào mô hình bài toán thực tế như xử lý tín hiệu điều khiển khi vượt quá tín hiệu cơ cấu chấp hành cho phép.

## CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Trong quá trình làm đồ án, việc xây dựng lý thuyết và triển khai thuật toán điều khiển cho đối tượng phi tuyến đã phân nào cho thấy việc điều khiển xe tự hành đi theo quỹ đạo đặt ra tương đối tốt. Việc bóc tách từng mô hình cũng như phân tích, thiết kế bộ điều khiển riêng rẽ thì nhóm có thể ứng dụng được những lý thuyết cơ bản. Tuy nhiên, khi ghép nối các bộ điều khiển, chất lượng điều khiển của một số phương pháp nhóm đề ra chưa được tốt, tín hiệu trạng thái vị trí của xe chưa bám quỹ đạo đặt ra.

Qua kết luận trên chúng em xin đề xuất thêm hướng phát triển để hoàn thiện đồ án này:

- Sử dụng hàm khác thay thế cho hàm dấu, hàm bão hòa cho mặt trượt.
- Giả sử có nhiễu tác động vào tín hiệu điều khiển, giải quyết bằng cách xây dựng bộ quan sát nhiễu.
- Thực hiện các thuật toán điều khiển tối ưu, phát triển đối tượng chứa thông số bất định.
- Triển khai mô hình thực tế, giải quyết bài toán tín hiệu điều khiển vượt quá tín hiệu cơ cấu chấp hành cho phép.
- Có thể thử phương pháp tuyến tính hóa quanh điểm làm việc, để so sánh kết quả với bộ điều khiển phi tuyến trực tiếp
- Làm bài toán nhận dạng, xấp xỉ mô hình hệ thống bằng công cụ mờ, nơ-ron.
- Thiết kế bộ điều khiển phi tuyến khi xét thêm yếu tố hệ số trượt của bánh xe.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. A. Dhaouadi R, “Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework, 2013.
- [2] Sašo Blažič, “A novel trajectory-tracking control law for wheeled mobile robots,” Pages 1001-1007, 11, 2011.
- [3] Nguyễn Doãn Phước, Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến, Bách khoa Hà Nội, 2012.
- [4] Nguyễn Doãn Phước, Lí thuyết điều khiển tuyến tính, Bách khoa Hà Nội, 2014.
- [5] N. D. Phước, Nhận dạng hệ thống điều khiển, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2005.
- [6] A. Z. S. B. I. Š. Gregor Klancar, WHEELED MOBILE ROBOTICS From Fundamentals Towards Autonomous Systems, 2017.
- [7] N. H. Nam, Điều khiển mờ và mạng nơ-ron, Hà Nội, 2021.
- [8] H S. Chiraz Ben Jabeur, Design of a PID optimized neural networks and PD fuzzy logic controllers for a two-wheeled mobile robot, Asian Journal of Control: 1–19, 2020.
- [9] R. N. D. T. D. S. S. H. A. V. R. Syed Inthiyaz, GA based PID controller: Design and Optimization, 6th International Conference on Inventive Computation Technologies, 2021..
- [10] H. N. Nguyễn và D. P. Nguyễn, Overshoot and settling time assignment with pid for first-order and second-order systems, IET Control Theory and Applications, 2018.
- [11] A. Bartoszewicz, Robust control, theory and applications, 2011.
- [12] S. J. H. W. Kim, Control of a two-wheel robotic vehicle for personal transportation, Robotica, 2014.
- [13] R. Brockett, Asymptotic stability and feedback stabilization, in: Differential Geometric Control Theory, Birkhäuser, Boston, MA: pp. 181–191, 1983.
- [14] F. L. L. R. Fierro, Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics, Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control..
- [15] T. R. Kurfess, Robotics and Automation Handbook, 2005.
- [16] P. R. D. R. & M. M. Wurman, Wurman, P. R., D'Andrea, R., & Mountz, M, 2008.
- [17] C. P. Cândido, AUXILIARY MECHANISMS FOR TELEROBOTICS, 2008.

## PHỤ LỤC

### Lý thuyết ổn định Lyapunov

Xét hệ phi tuyến tự trị (không bị kích thích), không dừng, cân bằng tại gốc tọa độ và có mô hình không bị kích thích [3]:

$$\frac{d\underline{x}}{dt} = f(\underline{x}, t) \text{ với } \underline{f}(\underline{0}, t) = \underline{0}, \forall t \geq 0 \quad (7.1)$$

Khi đó hệ sẽ được gọi là:

- a) Ổn định tại  $t_0$ , nếu với mọi  $\varepsilon > 0$  bao giờ cũng tồn tại  $\delta(\varepsilon, t_0)$  sao cho quỹ đạo trạng thái tự do  $\underline{x}(t)$  của nó, tức là nghiệm của (7.1), với điều kiện đầu  $\underline{x}(0) = \underline{x}_0 \in \Theta$ , thỏa mãn:

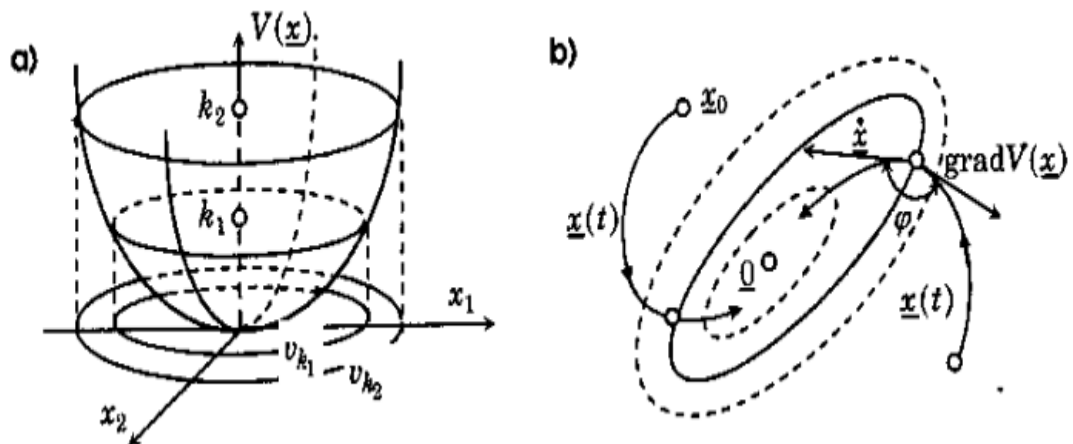
$$|\underline{x}_0| < \delta(\varepsilon, t_0) \Rightarrow |\underline{x}(t)| < \varepsilon, \forall t \geq t_0$$

- b) Ổn định tiệm cận tại  $t_0$ , nếu nó ổn định và còn có  $\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{x}(t) = \underline{0}$ .

Để trả lời được câu hỏi làm thế nào xét được tính ổn định của hệ (7.1) mà không cần phải tìm nghiệm  $\underline{x}(t)$  của nó thỏa mãn mọi điều kiện đầu  $\underline{x}(0) = \underline{x}_0 \in \Theta$  nào đó của gốc tọa độ, Lyapunov (1857-1918) đã đưa ra ý tưởng xây dựng xung quanh gốc tọa độ một họ các đường cong kín bao gốc được lấy từ đường đồng mức của một hàm nhiều biến trơn  $V(\underline{x})$  nào đó thỏa mãn:

- 1) Xác định dương, tức là  $V(\underline{x}) > 0, \forall \underline{x} \neq \underline{0}$  và  $V(\underline{x}) = 0$  (7.2)

- 2) Đơn điệu tang theo  $\underline{x}(t)$  và có  $\lim_{|\underline{x}| \rightarrow \infty} V(\underline{x}) = \infty$  (7.3)



Hình trên minh họa việc xây dựng họ các đường cong bao gốc này cho hệ bậc hai được lấy từ đường đồng mức của hàm:

$$V(\underline{x}) = ax_1^2 + bx_2^2 \text{ có } a > 0 \text{ và } b > 0$$

Nếu ta cắt ngang mặt cong  $V(\underline{x})$  bằng một mặt phẳng  $V(\underline{x}) = k_1$  và chiếu nó xuống dưới đáy  $(x_1, x_2)$  ta sẽ được đường đồng mức  $v_{k_1}$  (quỹ tích của tất cả các điểm  $\underline{x}$  mà tại đó hàm  $V(\underline{x})$  có cùng giá trị  $k_1$ ). Tương tự nếu cắt nó bằng một mặt phẳng khác có  $V(\underline{x}) = k_2 > k_1$  và lại chiếu xuống đáy ta sẽ được đường đồng mức  $v_{k_2}$  và do có các tính chất (7.2), (7.3) của hàm  $V(\underline{x})$  nên trong toàn bộ không gian trạng thái, đường đồng mức  $v_{k_2}$  sẽ bao đường đồng mức  $v_{k_1}$  bên trong nó. Điều này chỉ ra rằng vector gradient của  $V(\underline{x})$ , ký hiệu bởi:

$$\text{grad}V(\underline{x}) = \left( \frac{\partial V}{\partial \underline{x}} \right)^T = \left( \frac{\partial V}{\partial x_1}, \frac{\partial V}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial V}{\partial x_n} \right)^T$$

là vector luôn vuông góc với đường đồng mức và chỉ chiều tăng giá trị của hàm (hình 7.1b), đồng thời sẽ có hướng chỉ từ bên trong ra bên ngoài.

Sau khi đã xây dựng được họ đường cong bao gốc bằng đường đồng mức của hàm xác định dương  $V(\underline{x})$  thì để kiểm tra hệ ổn định tại  $\underline{0}$  hay không ta chỉ cần kiểm tra xem nghiệm  $\underline{x}(t)$  của (7.1) đi từ điểm trạng thái đầu tùy ý  $\underline{x}_0 \in \Theta$  có cắt các đường cong này theo hướng ngoài vào trong hay không (hình 7.1b). Nếu  $\underline{x}(t)$  cắt mọi đường cong theo chiều từ ngoài vào trong thì hiển nhiên  $\underline{x}(t)$  sẽ tích tiến về  $\underline{0}$  và do đó hệ sẽ ổn định tiệm cận  $\underline{0}$ . Trong trường hợp  $\underline{x}(t)$  không cắt bất cứ một đường cong nào theo hướng từ trong ra ngoài (chỉ cắt từ ngoài vào trong hoặc tiếp xúc hoặc ở lại trên đó) thì  $\underline{x}(t)$  sẽ ở lại trong một lân cận bị chặn nào đó của gốc và hệ là ổn định.

Từ đây ta đi đến một điều kiện đủ cho việc kiểm tra tính ổn định của hệ (7.1) mà không cần phải tìm nghiệm  $\underline{x}(t)$  của nó như sau:

Xét hệ (7.1). Gọi  $V(\underline{x})$  là hàm thỏa mãn (7.2) và (7.3). Ký hiệu:

$$-W(t) = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \underline{f}(\underline{x}) \stackrel{d.n.}{=} L_{\underline{f}}V(\underline{x}), \text{ ký hiệu của đạo hàm Lie}$$

Khi đó:

- Nếu  $W(\underline{x})$  xác định dương trong một lân cận  $\Theta$  của gốc thì hệ là ổn định tiệm cận tại gốc tọa độ với miền ổn định  $\Theta$ . Nếu có thêm  $\Theta = R^n$  thì hệ là ổn định tiệm cận toàn cục (GAS – global asymptotically stable).
- Khi  $W(\underline{x}) \geq 0, \forall \underline{x} \in \Theta$  (xác định bán dương) thì hệ ổn định tại gốc tọa độ.

Chương minh:

Gọi  $\varphi$  là góc tạo bởi gradient  $\text{grad}V(\underline{x})$  và vector chỉ hướng của quỹ đạo trạng thái  $\underline{x}(t)$ , tức là của  $\frac{d\underline{x}}{dt} = \underline{f}(\underline{x})$ , thì với tính chất của vector gradient



$gradV(\underline{x})$  ta có thể dễ dàng kiểm tra được chiều cắt của quỹ đạo trạng thái  $\underline{x}(t)$  khi  $\underline{x} \neq \underline{0}$  như sau (hình 7.1b):

$$\begin{aligned}\varphi &= \begin{cases} > 90^\circ & \text{cắt từ ngoài vào trong} \Rightarrow \text{ổn định tiệm cận} \\ \geq 90^\circ & \text{cắt từ ngoài vào trong hoặc tiếp xúc} \Rightarrow \text{ổn định} \end{cases} \\ &\Leftrightarrow \frac{dV}{dt} = (gradV)^T \frac{d\underline{x}}{dt} = |gradV(\underline{x})| \left| \frac{d\underline{x}}{dt} \right| \cos\varphi \\ &= \begin{cases} < 0 & \Rightarrow \text{ổn định tiệm cận} \\ \leq 0 & \Rightarrow \text{ổn định} \end{cases}\end{aligned}$$

Đó chính là điều phải chứng minh.