

**PHENIKAA UNIVERSITY**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND  
MECHATRONICS**

**PROJECT OF MECHATRONICS SYSTEM DESIGN**



**DESIGN AND SIMULATION OF A THREE-DEGREES-OF-  
FREEDOM WELDING ROBOT ALONG A STRAIGHT SEAM**

PHENIKAA  
UNIVERSITY

**STUDENTS:**

**STUDENT1 19010191\_LE DUC MANH**

**STUDENT2 19010183\_NGO KIM BACH**

**STUDENT3 19010185\_NGUYEN HAI DANG**

**Advisor: TRAN NGOC AN**

**2023**

# **TRƯỜNG ĐẠI HỌC PHENIKAA**

## **KHOA CƠ KHÍ CƠ ĐIỆN TỬ**

### **ĐỒ ÁN THIẾT KẾ HỆ THỐNG CƠ ĐIỆN TỬ**



#### **TÍNH TOÁN THIẾT KẾ, MÔ PHỎNG ROBOT HÀN ĐƯỜNG THẲNG 3 BẬC TỰ DO**

**SINH VIÊN THỰC HIỆN:**

**SINH VIÊN 1 19010191\_LÊ ĐỨC MẠNH**

**SINH VIÊN 2 19010183\_NGÔ KIM BÁCH**

**SINH VIÊN 3 19010185\_NGUYỄN HẢI ĐĂNG**

**Người hướng dẫn: TRẦN NGỌC AN**

**2023**

## **PROJECT OF MECHATRONICS SYSTEM DESIGN REPORT**

*Team*

**Le Duc Manh - 19010191**  
**Ngo Kim Bach - 19010183**  
**Nguyen Hai Dang - 19010185**

*Advisor*

**PhD. Tran Ngoc An**

### **Tóm tắt nội dung**

Mục tiêu ứng dụng của kỹ thuật robot trong công nghiệp là nhằm nâng cao năng suất dây chuyền công nghệ, nâng cao chất lượng và khả năng cạnh tranh của sản phẩm, đồng thời cải thiện điều kiện lao động. Sự cạnh tranh hàng hoá đặt ra một vấn đề thời sự là làm sao để hệ thống tự động hoá sản xuất phải có tính linh hoạt cao nhằm đáp ứng với sự biến động thường xuyên của thị trường hàng hoá cạnh tranh. Robot công nghiệp là bộ phận cấu thành không thể thiếu trong việc tạo ra những hệ thống tự động sản xuất linh hoạt đó.

Nội dung đề tài trình bày về tính toán robot hàn đường thẳng có ba bậc tự do. Các nội dung tính toán gồm: Động lực học thuận, động lực học ngược, thiết kế quỹ đạo chuyển động và tính toán điều khiển.

Đây là một đề tài mang tính thực tế cao, khi mà công nghiệp ngày càng phát triển sự cạnh tranh không ngừng đòi hỏi năng suất và chất lượng phải được cải thiện nhờ dây chuyền máy móc hiện đại thay thế lao động chân tay của con người.

Các kiến thức trong đề án giúp sinh viên củng cố ôn tập những kiến thức đã học, đồng thời làm quen, tìm hiểu tính toán, mô phỏng một hệ cơ điện tử điển hình.

Do thời gian có hạn cũng như những hạn chế về mặt kiến thức, sinh viên mới chỉ giải quyết một số vấn đề cơ bản trong việc thiết kế một robot. Ngoài ra còn rất nhiều vấn đề cần phải nghiên cứu sâu hơn để có một sản phẩm robot hoàn thiện.

### **Abstract**

*The application of robotics in industry is to improve the productivity of technological lines, improve the quality and competitiveness of products, and improve working conditions. The production automation system must be highly flexible to respond to the frequent fluctuations of the*

## ***Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics***

*competitive commodity market. Industrial robots are an integral part of creating such flexible automated production systems.*

*The content of the project presents the calculation of a three-degrees-of-freedom welding robot along a straight seam. The calculation contents include: kinetics, kinematics, motion trajectory design and control calculations.*

*This is a highly practical topic when the industry is increasingly developing, the competition requires productivity and quality to be improved thanks to modern machinery lines replacing manual labor.*

*The contents of the project help students consolidate and review the knowledge they have learned, as well as learn to calculate and simulate a typical mechatronic system.*

*Due to limited time and knowledge limitations, students only deal with some basic problems in designing a robot. There are also many issues that need to be studied further to have a complete robot product.*



**PHENIKAA**  
UNIVERSITY

**Mục lục**

	Trang
Tóm tắt nội dung	3
1. Đặt vấn đề và xác định vấn đề	8
1.1. Đặt vấn đề	8
1.2. Xác định vấn đề	8
2. Khảo sát thông tin	8
3. Mục tiêu	11
4. Giải pháp đề xuất	12
4.1. Các phương án thiết kế	12
4.2. Giới hạn của giải pháp/sản phẩm	13
5. Phân tích các tác động/ảnh hưởng	13
5.1. Tính khả thi về công nghệ	13
5.2. Tính khả thi về kinh tế	13
5.3. Tác động xã hội	13
5.4. Tác động về hoạt động	13
5.5. Tác động về môi trường	13
5.6. Tiêu chuẩn đạo đức	14
6. Kế hoạch thực hiện	14
6.1. Thành viên	14
6.2. Kế hoạch và tiến hành	14
7. Tiến trình dự án	15
7.1. Mô hình chung	15
7.2. Bài toán động học thuận	16
7.3. Bài toán động học ngược	19
7.4. Thiết lập quỹ đạo chuyển động	20
7.5. Không gian làm việc của robot	24
7.6. Thiết lập phương trình động lực học	25
7.7. Tổng quan về thiết kế bộ điều khiển	33
8. Kết quả và thảo luận	38
9. Phân tích rủi ro	38
10. Báo cáo tài chính và kinh tế	41
11. Kết luận	41
12. Tiêu chuẩn	41
13. Tài liệu tham khảo	41

**Danh sách hình ảnh**

	Trang
Hình 1. Mô hình 3D của robot	15
Hình 2. Không gian làm việc Oxy	24
Hình 3. Không gian làm việc Oxyz	25
Hình 4. Sơ đồ điều khiển	34
Hình 5. Đồ thị $q_1$ , $q_1d$ theo thời gian	35
Hình 6. Đồ thị $q_2$ , $q_2d$ theo thời gian	35
Hình 7. Đồ thị $q_3$ , $q_3d$ theo thời gian	36
Hình 8. Đồ thị $dq_1$ , $dq_1d$ theo thời gian	36
Hình 9. Đồ thị $dq_2$ , $dq_2d$ theo thời gian	37
Hình 10. Đồ thị $dq_3$ , $dq_3d$ theo thời gian	37



**Danh sách bảng**

	Trang
Bảng 9.1. Các yếu tố rủi ro	38
Bảng 9.2. Lựa chọn thang đo xác suất	39
Bảng 9.3. Lựa chọn thang đo tác động	39
Bảng 9.4. Ma trận tham chiếu rủi ro	40
Bảng 9.5. Phân loại các rủi ro theo điểm rủi ro	40
Bảng 9.6. Mức độ rủi ro theo từng yếu tố rủi ro	41



## **1. Đặt vấn đề và xác định vấn đề**

### *1.1. Đặt vấn đề*

Với một nền kinh tế phát triển nhanh như tại Việt Nam hiện nay, sử dụng robot trong công nghiệp là một xu thế tất yếu. Từ sau khi đại dịch covid trở thành vấn nạn trên toàn cầu về nguồn cung lao động, robot lại tỏ ra hữu hiệu hơn bao giờ hết với tất cả các lĩnh vực sản xuất.

Sử dụng robot trong công nghiệp giúp tiết kiệm nhân công, thời gian và cho các sản phẩm có tính đồng đều cao. Đặc biệt, robot hàn là một trong những ứng dụng mũi nhọn của robot, cụ thể có thể thấy trong các ngành sản xuất khung ô tô, xe máy, lan can, cổng cửa, bàn ghế học sinh, giá kệ siêu thị...

Robot hàn là một loại robot đã được lập trình sẵn giúp người chủ hoàn toàn tự động hóa quá trình hàn cơ khí. Tùy vào từng mục đích sử dụng mà thị trường đã cho ra đời nhiều loại robot hàn gia công cơ khí khác nhau về đầu hàn như robot hàn tích, hàn dây, hàn điểm hay hàn Laser (laze).

Robot hàn được áp dụng vào các dây chuyền sản xuất tự động đòi hỏi tính chuyên môn, phức tạp như lĩnh vực sản xuất ô tô, xe máy, đường ống, giá đỡ,..., robot hàn sẽ giúp ích rất nhiều và đem lại hiệu quả vượt trội so với lao động thủ công thông thường.

Trong gần 50 năm qua, ngành công nghiệp sản xuất ô tô đã không ngừng đổi mới để có được diện mạo như ngày hôm nay. Các hãng sản xuất ô tô như Ford, Mercedes, Toyota, Honda, Nissan, v.v... đều ứng dụng dây chuyền sản xuất và lắp ráp tự động, trong đó robot hàn chiếm 40%.

### *1.2. Xác định vấn đề*

Ứng dụng của robot hàn: Sử dụng trong hầu hết các nguyên công hàn công nghiệp trong sản xuất với các ưu điểm như sau:

- Vận hành dễ dàng;
- Chi phí hợp lý;
- Năng lực làm việc vượt trội;
- Khả năng làm việc chính xác cao;
- An toàn lao động;
- Giải quyết bài toán thiếu tay nghề của người thợ.

## **2. Khảo sát thông tin**

Trong quá trình phát triển của robot hàn, các nhà sản xuất đã phân chia sản phẩm thành 4 loại chính, tương ứng với các công nghệ được áp dụng trên chúng. Dưới đây là một số thông tin về các loại robot hàn đáng chú ý:

### ● Robot hàn ABB

ABB Group là một trong những công ty hàng đầu thế giới với trụ sở chính ở Thụy Sĩ. Robot hàn ABB được sản xuất trên dây chuyền hiện đại, đảm bảo chất lượng tuyệt vời. Các ưu điểm nổi bật



của robot hàn ABB bao gồm đường cắt chính xác, tốc độ nhanh, thiết kế nhỏ gọn và hiệu suất hoạt động cao. Một số sản phẩm phổ biến của robot hàn ABB là ABB IRB 1600ID, ABB 1520ID và ABB IRB 2600ID.



- Robot hàn laser

Loại robot này sử dụng tia laser có công suất lớn, có khả năng điều khiển từ xa. Robot hàn laser được ứng dụng rộng rãi trong các phân xưởng cơ khí với độ chính xác cao, áp suất lớn và tốc độ hàn nhanh. Chúng có thể điều chỉnh theo hình dạng và kích thước của vật liệu hàn và di chuyển các khớp bằng trục. Một số sản phẩm robot hàn laser phổ biến là robot hàn laser Panasonic và laser RBWLS.



- Robot hàn MIG

Robot hàn MIG sở hữu độ sai số thấp, thiết kế nhỏ gọn và tinh tế. Nó sử dụng tia MIG/MAG để đưa ra các mối hàn chất lượng cao với tốc độ vượt trội. Các phần mềm hỗ trợ trên bàn điều khiển cùng với cánh tay robot thiết kế dài và trọng lượng nhẹ từ 6-10kg. Một số sản phẩm nổi bật của robot hàn MIG là TaWRs TM-1800 và TM GILL 3500.



- Robot hàn OTC

Loại robot này có kích thước nhỏ gọn và có thể áp dụng cho hàn CO<sub>2</sub>/MIG/MAG/TIG cũng như gấp sản phẩm. Robot hàn OTC có hệ thống cấp chạy trong thân máy, giúp nó hoạt động linh hoạt trong môi trường không gian chật hẹp. Thường có khớp thẳng đứng và 6 cấp tự do. Một số sản phẩm của robot hàn OTC là dòng FD (FD-H5, FD-B6L, FD-BsS), OTC V8L chuẩn Nhật Bản.



- Robot hàn TIG

Đây là một thiết bị hàn chuyên nghiệp được sử dụng để hàn các kim loại như thép không gỉ, nhôm và đồng. Robot hàn TIG đảm bảo độ chính xác và độ bền cao trong quá trình hàn. Nó có khả năng điều chỉnh dòng điện hàn và thời gian hàn, giúp người dùng tùy chỉnh các thông số để đáp ứng nhu cầu hàn của mình. Một số dòng sản phẩm nổi bật là TIG AC/DC Omega 3000DT và VGII TIG 2000DT.



### 3. Mục tiêu

Mục tiêu thiết kế robot hàn thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật như sau

- Đối tượng thao tác và dạng thao tác

- Bề mặt giáp nối của dầm chữ T được ghép bởi hai tấm thép. Chiều dài tối đa của đường hàn là 1000mm.

- Ứng dụng trong một số kết cấu khung.

- Yêu cầu kỹ thuật

Kiểu hàn: Hàn MAG trong môi trường khí CO<sub>2</sub>, hàn đứng

Vật liệu: Thép hợp kim thấp

Bề dày 2 tấm vật liệu là bằng nhau nên góc hàn sẽ là 45/45 độ

Góc nghiêng mũi hàn 60-80 độ so với mặt nằm ngang

Bề dày vật liệu 5mm tra bảng thông số ta có:

Đường kính dây hàn: 1.2mm

Dòng hàn 250-280 A

Tốc độ hàn: 40-50 cm/ph, gia tốc hàn bằng 0

Lưu lượng khí: 15-20 l/phút

- Dạng thao tác

Di chuyển robot sao cho mũi hàn chạy dọc theo đường hàn với tốc độ cố định, phủ kín hồ quang lên mỗi hàn,

Sau khi kết thúc quá trình hàn, cần đưa mỗi hàn về vị trí an toàn để thay cấp phôi mới.

Thao tác này được cấu thành từ các thao tác cơ bản là chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay của các khâu

Ngoài ra còn lực tiếp xúc giữa mũi hàn và chi tiết trong quá trình hàn

- Yêu cầu về vị trí và vận tốc của robot

- Yêu cầu về vị trí của robot hàn:

Di chuyển đầu mũi hàn đến các vị trí cần hàn của chi tiết

Mũi hàn phải đi hết được đường hàn, và đến được vị trí thoát mũi hàn an toàn. Trong quá trình hoạt động robot không được va chạm vào chi tiết.

- Yêu cầu về vận tốc

Đầu mũi hàn di chuyển với tốc độ 40-50 cm/phút

- Yêu cầu về hướng của khâu thao tác

Trong quá trình hàn chi tiết, để robot hàn dễ dàng và năng suất hơn mũi hàn cần nghiêng một góc nhất định so với phương thẳng đứng. Mũi hàn cần tiếp cận mỗi hàn theo góc 45/45 độ và nghiêng 60-80 độ so với mặt ngang

## **4. Giải pháp đề xuất**

### **4.1. Các phương án thiết kế**

#### **4.1.1. Phương án 1: Robot TTT**

Ưu điểm

- Kết cấu đơn giản, đảm bảo tính linh hoạt
  - Ba khớp tịnh tiến giúp có thể chuyển động quét, vào ra mặt làm việc, tránh va chạm
- Nhược điểm
- Diện tích khâu để lớn, yêu cầu độ cứng vững cao.

#### **4.1.2. Phương án 2: Robot RRR**

Ưu điểm

- Kết cấu đơn giản
- Thông dụng, dễ chế tạo, chi phí thấp
- Đảm bảo linh hoạt về thao tác

Nhược điểm

- Không gian làm việc lớn
- Không đảm bảo hướng tiếp cận của mũi hàn

#### **4.1.3. Phương án 3: Robot RRT**

Ưu điểm

- Thiết kế nhỏ gọn, không gian thao tác nhỏ
- Đảm bảo sự linh hoạt
- Đảm bảo về hướng của khâu thao tác

- Yêu cầu độ cứng vững không cao

- Dễ chế tạo, giá thành rẻ

Nhược điểm

- Kích thước vật hàn không lớn

- Chỉ hàn trên mặt phẳng đứng

Trên cơ sở phân tích ưu, nhược điểm, tiến hành lựa chọn phương án thứ ba.

#### *4.2. Giới hạn của giải pháp/sản phẩm*

Trong phạm vi đề án với kiến thức của sinh viên, lựa chọn phương án robot 3 bậc tự do, do đó chỉ tiến hành hàn đường thẳng.

### **5. Phân tích các tác động/ảnh hưởng**

#### *5.1. Tính khả thi về công nghệ*

Đề tài hướng dẫn là phù hợp với chuyên môn của giáo viên hướng dẫn, sinh viên đã được học các học phần Động lực học hệ nhiều vật, Kỹ thuật robot, Lập trình robot công nghiệp, Lập trình mô phỏng robot và các hệ cơ điện tử.

#### *5.2. Tính khả thi về kinh tế*

Đề tài tập trung tính toán và mô phỏng, do đó không yêu cầu về vấn đề kinh tế khi triển khai.

#### *5.3. Tác động xã hội*

Nếu như tính chi phí khấu hao của robot so với việc thuê công nhân vận hành thì giá robot hàn ở thị trường Việt Nam ở mức hợp lý. Khi sử dụng robot người chủ không cần phải trả thêm 1 khoản lương độc hại và thời gian robot làm việc ổn định, kéo dài hơn rất nhiều so với con người. Từ đó tiết kiệm một khoản đầu tư khá lớn cho doanh nghiệp.

#### *5.4. Tác động về hoạt động*

Tuy việc đầu tư ban đầu thường lớn hơn so với việc thuê nhân thêm 1 nhân công nhưng thời gian và năng lực làm việc của robot hàn lại hoàn toàn ưu Việt hơn nhiều. Robot hàn hầu như không cần thời gian nghỉ, làm việc được ở các vị trí khó, cho sản phẩm chất lượng đồng đều và không bị ảnh hưởng bởi các loại khí hàn độc hại.

Với hành trình làm việc được thiết lập sẵn, robot hàn cho độ chính xác cao, đường hàn đồng đều từ đó sản phẩm tạo thành có chất lượng tương đương nhau. Bằng khả năng làm việc chính xác cao robot hàn thường được sử dụng trong các ngành chế tạo ô tô, xe máy... hoặc các công việc đòi hỏi sự đồng nhất về sản phẩm mà sử dụng người lao động khó có thể làm được.

#### *5.5. Tác động về môi trường*

Nếu như công việc hàn gây ra khói hàn, xỉ hàn, ánh sáng hồ quang tác động khá nhiều đến sức khỏe cho người lao động thì khi sử dụng robot hàn vấn đề này ngay lập tức được giải quyết.

Bên cạnh đó, những công việc có mức độ nguy hiểm cao, các tư thế hàn khó sẽ không đảm bảo an toàn lao động cho công nhân thì sử dụng robot hàn tỏ ra hiệu quả hơn cả. Đây chính là một trong những yếu tố khiến người chủ doanh nghiệp cân nhắc khi lựa chọn ứng dụng công nghệ robot hàn vào sản xuất.

5.6. *Tiêu chuẩn đạo đức*

Đạo đức kỹ thuật là một phần quan trọng trong giáo dục kỹ thuật và cũng như trong các hoạt động nghề nghiệp khác. Để trở thành kỹ sư Cơ điện tử với kiến thức chuyên môn cũng như thỏa mãn tiêu chuẩn nghề nghiệp về đạo đức, nhóm đề tài đã tham khảo các tiêu chuẩn đạo đức theo Hiệp hội Kỹ sư Cơ khí Hoa Kỳ (The American Society of Mechanical Engineers). Theo đó, nhóm đề tài bước đầu thực hiện các quy trình cụ thể trong tiêu chuẩn đạo đức kỹ thuật như quan tâm và có đánh giá tới các yếu tố tác động về kỹ thuật và kinh tế (mục 5.2), xã hội (mục 5.3), hoạt động khi vận hành (mục 5.4) và ảnh hưởng của sản phẩm tới môi trường (mục 5.5).

**6. Kế hoạch thực hiện**

6.1. *Thành viên*

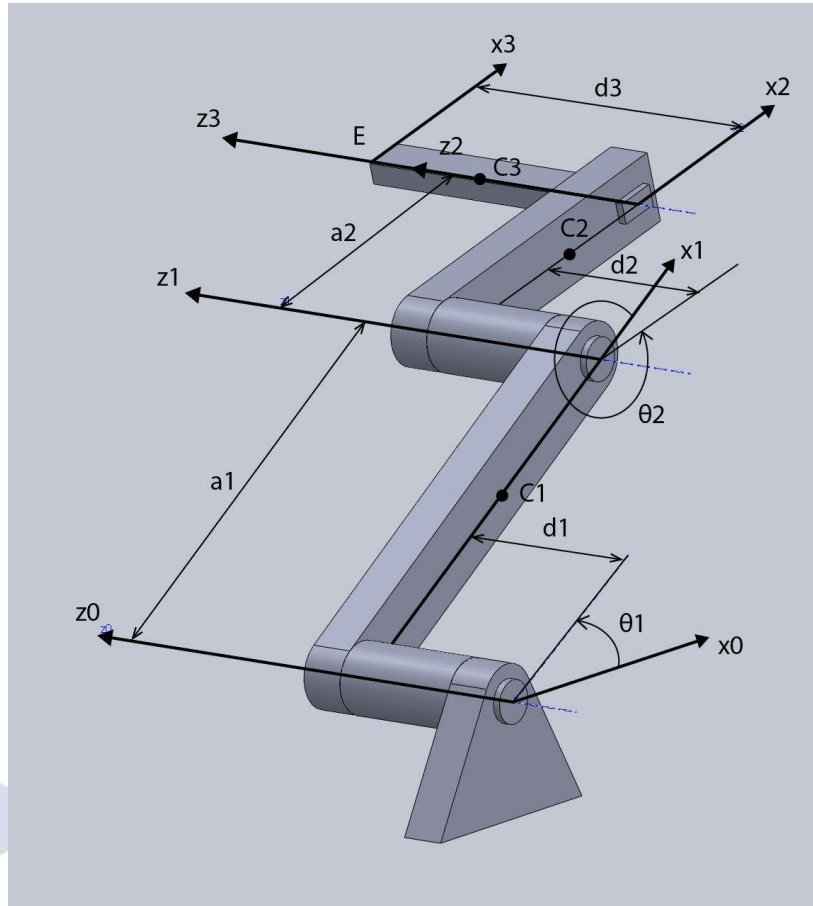
STT	Tên thành viên	Lớp + MSSV	Nhiệm vụ (Ghi rõ Mục phụ trách)
1	Lê Đức Mạnh	KT CĐT – K13 – 19010191	Nhóm trưởng, Phân chia nhiệm vụ, Bài toán động lực học, Tính toán điều khiển
2	Ngô Kim Bách	KT CĐT – K13 – 19010183	Viết báo cáo, Bài toán động học ngược, Thiết kế quỹ đạo chuyển động
3	Nguyễn Hải Đăng	KT CĐT – K13 – 19010185	Hoàn thiện powerpoint, Lựa chọn robot, Bài toán động học thuận.

6.2. *Kế hoạch và tiến trình*

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T0	T1	T1	T1	T1	T1	T1
Phân tích cấu trúc và lựa chọn robot																
Bài toán động học thuận																
Động học ngược																
Lập trình quỹ đạo																
Tính toán động lực học																
Thiết kế bộ điều khiển																
Viết báo cáo																

## 7. Tiến trình dự án

### 7.1. Mô hình chung:



Hình 1. Mô hình 3D của robot

Tay robot có 3 bậc tự do, thiết kế cơ khí dạng 2 khớp xoay, 1 khớp tịnh tiến. Các khớp quay hoạt động được nhờ các động cơ điện một chiều có phản hồi vị trí tạo một vòng điều khiển kín. Chuyển động theo phương thẳng đứng nằm ngang được thực hiện bằng trục vít me đai ốc.

Hệ dẫn động gồm có:

- Khâu 0 (khâu đế): Khâu cố định
- Khâu 1: Khâu động quay quanh trục nằm ngang
- Khâu 2: Khâu động quay quanh trục nằm ngang vuông góc với trục khâu cố định và ở cuối khâu 1
- Khâu 3: Khâu động tịnh tiến theo phương vuông góc với trục khâu cố định và ở cuối khâu 2.

7.2. *Bài toán Động học thuận*

7.2.1. Phương pháp Denavit-Hartenber

Quy tắc do Denavit-Hartenberg (DH) đề xuất năm 1955 được sử dụng phổ biến để mô tả mối quan hệ về mặt động học giữa hai khâu liên tiếp, Theo phương pháp DH, thứ tự các khâu và khớp được đánh số như sau: khâu số 0 là giá cố định đối với tay máy thường, còn đối với máy lắp trên giá di động thì khâu số 0 chính là giá di động đó. Khâu đầu tiên nối với giá là khâu 1 và tăng dần đến khâu  $n$  là bàn kẹp hoặc dụng cụ chuyên dụng. Các khớp cũng được đánh số từ 1 đến  $n$ , khớp nối của giá với khâu 1 là khớp số 1.

Theo quy tắc DH, ta dựng các hệ trục tọa độ khâu ( $i$ ) như sau:

- Trục  $z(i)$  là trục của khớp ( $i + 1$ ) nối khâu ( $i$ ) với khâu ( $i + 1$ );
- Gốc  $O(i)$  là giao điểm của  $z(i)$  với đường vuông góc chung của hai trục  $z(i)$  và  $z(i - 1)$
- Trục  $x(i)$  là đường vuông góc chung của hai trục  $z(i - 1)$  và  $z(i)$ , hướng từ  $z(i - 1)$  sang  $z(i)$ ;
- Trục  $y(i)$  được chọn sao cho hệ trục tọa độ là thuận;

Theo quy tắc này, trong các trường hợp sau đây, việc xây dựng hệ tọa độ khâu là không duy nhất:

- Hệ tọa độ 0 mới chỉ có trục  $z(0)$  xác định, còn lại gốc  $O(0)$  và hướng trục  $x(0)$  có thể chọn tùy ý;
- Hệ tọa độ  $n$ , do không có khớp ( $n + 1$ ), trục  $z(n)$  có thể chọn tùy ý và trục  $x(n)$  phải vuông góc với  $z(n - 1)$ . Thông thường nếu khớp  $n$  là khớp quay, nên chọn  $z(n)$  song song với  $z(n - 1)$ ;
- Nếu hai trục khớp liên tiếp song song, thì đường vuông góc chung là không duy nhất. Nếu hai trục khớp liên tiếp giao nhau, thì hướng của trục  $x$  là tùy ý;
- Nếu khớp  $i$  là tịnh tiến, chiều trục  $z(i)$  là tùy ý.

Trong các trường hợp nêu trên, ta nên chọn các phương án để cho thủ tục tính được đơn giản, chẳng hạn có thể chọn để các trục của hai hệ liên tiếp song song. Sau khi xây dựng các hệ trục tọa độ khâu, vị trí và hướng của hệ ( $i$ ) so với hệ ( $i - 1$ ) được xác định bởi các thông số sau:

$a_i$  khoảng cách giữa  $O_i$  và  $O'_{i-1}$ ;

$d_i$  là tọa độ của  $O_i$  trên trục  $z(i - 1)$ ;

$\alpha_i$  góc giữa trục  $z(i - 1)$  và  $z(i)$  quay quanh trục  $x(i)$  và được lấy giá trị dương nếu quay ngược chiều kim đồng hồ;

$\theta$  là góc giữa trục  $x(i - 1)$  và  $x(i)$  quay quanh trục  $z(i - 1)$ , được lấy giá trị dương khi quay ngược chiều kim đồng hồ.

Hai thông số trong bốn thông số trên ( $a_i$  và  $\alpha_i$ ) luôn là hằng số và chỉ phụ thuộc vào tính chất hình học nối giữa các khớp liên tiếp được thiết lập bởi khâu  $i$ . Hai thông số còn lại, chỉ một thông số là biến phụ thuộc vào dạng khớp giữa khâu ( $i - 1$ ) và khâu ( $i$ ). Cụ thể:

- Nếu khớp ( $i$ ) là quay thì góc  $\theta(i)$  là biến khớp;
- Nếu khớp ( $i$ ) là tịnh tiến thì dịch chuyển  $d(i)$  là biến khớp.

Từ đây có thể biểu diễn biến khớp  $q_i$  theo hai loại khớp một cách tổng quát như sau:

$$q_i = \delta\theta_i + (1 - \delta)d_i$$

với  $\delta = 1$  khi khớp ( $i$ ) là khớp quay và  $\delta = 0$  khi khớp ( $i$ ) là khớp tịnh tiến.

Từ đây, có thể chỉ ra các phép biến đổi tọa độ giữa hai hệ tọa độ liên tiếp ( $i$ ) và ( $i - 1$ ) như sau: (chuyển hệ ( $i - 1$ ) về trùng với hệ ( $i$ ) thông qua 4 phép di chuyển sau):

- Quay hệ ( $i - 1$ ) quanh trục  $z(i - 1)$  góc  $0(i)$  để trục  $x(i - 1)$  trở thành  $x'(i)$  song song với  $x(i)$ ;
- Tịnh tiến dọc trục  $z(i - 1)$  đoạn  $d(i)$  để  $x'(i)$  về trùng với  $x(i)$ ;



- Tịnh tiến dọc trục  $x(i)$  đoạn  $a(i)$  để gốc  $O'(i)$  về trùng với  $O(i)$ ;
- Quay quanh trục  $x(i)$  góc  $\alpha(i)$  để  $z'(i-1)$  về trùng với trục  $z(i)$ .

Từ các hệ trục đã xây dựng ở hình 1, ta có các tham số D-H như sau:

Khâu	$\theta$	$d_i$	$a_i$	$\alpha$
1	$q_1$	0	$a_1$	$0^\circ$
2	$q_2$	0	$a_2$	$0^\circ$
3	0	$q_3$	0	$0^\circ$

### 7.2.2. Tính toán các ma trận D-H

Chọn hệ trục tọa độ suy rộng như sau

$$q = \theta_1, \theta_2, d_3^T = q_1, q_2, q_3^T$$

Ký hiệu

$$C_i = \cos q_i, S_i = \sin q_i, C_{12} = \cos(q_1 + q_2), S_{12} = \sin(q_1 + q_2)$$

${}^{i-1}A_i$ : Ma trận biến đổi tọa độ thuần nhất của hệ  $i$  so với hệ  $i-1$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận biến đổi tọa độ thuần nhất từ hệ tọa độ khâu thứ nhất về hệ tọa độ cố định

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận biến đổi hệ tọa độ thuần nhất từ hệ tọa độ khâu thứ hai về hệ tọa độ trên khâu thứ nhất

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & a_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận biến đổi hệ tọa độ thuần nhất từ hệ tọa độ trên khâu thứ ba về hệ tọa độ trên khâu thứ hai

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận biến đổi tọa độ thuần nhất của hệ 2 so với hệ tọa độ cố định

$${}^0\mathbf{A}_2 = {}^0\mathbf{A}_1 \cdot {}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & -a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & a_2 \sin(q_1 + q_2) + a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận biến đổi tọa độ thuần nhất của khâu thao tác cuối so với hệ tọa độ cố định

$${}^0\mathbf{A}_3 = {}^0\mathbf{A}_1 \cdot {}^1\mathbf{A}_2 \cdot {}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & a_2 \sin(q_1 + q_2) + a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_3 & {}^0\mathbf{r}_3 \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

### 7.2.3. Vị trí, vận tốc, gia tốc điểm cuối E

- Vị trí điểm tác động cuối

$$\mathbf{r}_E = {}^0\mathbf{r}_3 = \begin{bmatrix} a_2 C_{12} + a_1 C_1 \\ a_2 S_{12} + a_1 S_1 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

Chọn quy luật chuyển động trong thời gian 5s

Chọn góc quay:  $\theta_1$  [min = 30°, max = 150°]

$\theta_2$  [min = 35°, max = 160°]

Khoảng trượt:  $d_3$  (mm) [min = 0.1, max = 0.3]

Như vậy quy luật chuyển động trong thời gian 5s của các biến khớp là

$$q_1 = 0.419t + 0.524$$

$$q_2 = 0.436t + 0.61$$

$$q_3 = 0.04t + 0.1$$

Với  $a_1 = 0.8\text{m}$ ,  $a_2 = 0.5\text{m}$

Ta được vị trí điểm tác động cuối E là

$$\mathbf{r}_E = \begin{cases} x_E = 0.5 \cos(0.855t + 1.134) + 0.8 \cos(0.419t + 0.524) \\ y_E = 0.5 \sin(0.855t + 1.134) + 0.8 \sin(0.419t + 0.524) \\ z_E = 0.04t + 0.1 \end{cases}$$

- Vận tốc điểm tác động cuối

$$\mathbf{v}_E = \dot{\mathbf{r}}_E = \begin{bmatrix} -a_2 S_{12}(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - a_1 S_1 \dot{q}_1 \\ -a_2 C_{12}(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + a_1 C_1 \dot{q}_1 \\ -\dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

Ta có

$$\mathbf{v}_E = \begin{bmatrix} -0.4275 \sin(0.855t + 1.134) + 0.3352 \cos(0.419t + 0.524) \\ 0.4275 \cos(0.855t + 1.134) + 0.3352 \sin(0.419t + 0.524) \\ 0.08 \end{bmatrix}$$

- Gia tốc điểm tác động cuối

$$\mathbf{a}_E = \dot{\mathbf{v}}_E = \ddot{\mathbf{r}}_E = \begin{bmatrix} -a_2[(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 C_{12} + (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) S_{12}] - a_1(\ddot{q}_1 \cdot S_1 + C_1 \dot{q}_1^2) \\ -a_2[-(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 S_{12} + (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) C_{12}] - a_1(\ddot{q}_1 \cdot C_1 - S_1 \dot{q}_1^2) \\ -\ddot{q}_3 \end{bmatrix}$$

Ta có

$$\mathbf{a}_E = \begin{bmatrix} -0.3655 \cos(0.855t + 1.134) - 0.14 \sin(0.491t + 0.524) \\ 0.3655 \sin(0.855t + 1.134) - 0.14 \sin(0.491t + 0.524) \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 7.3. Bài toán động học ngược

Ta có các giá trị cho trước của điểm E. Để điều khiển robot di chuyển theo các vị trí mong muốn của tay trong không gian, cần xác định các giá trị biến khớp tương ứng với vị trí và hướng của tay robot mong muốn. Đây là nội dung của bài toán động học ngược của robot.

Bài toán động học ngược về vị trí của robot:

Ta có:

$$\mathbf{r}_E = {}^0 \mathbf{r}_3 = \begin{bmatrix} a_2 C_{12} + a_1 C_1 \\ a_2 S_{12} + a_1 S_1 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

Lại có

$$\begin{aligned} x_E^2 + y_E^2 &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2(C_1 C_{12} + S_1 S_{12}) = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 C_2 \\ \Leftrightarrow \begin{cases} \cos(q_2) = \frac{x_E^2 + y_E^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \\ \sin(q_2) = \sqrt{1 - \cos^2(q_2)} \end{cases} &\Leftrightarrow q_2 = \arctan 2(\sin(q_2), \cos(q_2)) \end{aligned}$$

Ta có

$$\begin{cases} x_E = a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_1 \cos q_1 \\ y_E = a_2 \sin(q_1 + q_2) + a_1 \sin q_1 \\ z_E = q_3 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_E = (a_1 + a_2 C_2) C_1 - a_2 S_2 S_1 \\ y_E = a_2 S_2 C_1 + (a_1 + a_2 C_2) S_1 \end{cases}$$

Giải hệ phương trình đại số tuyến tính này, ta có

$$\begin{cases} \cos(q_1) = \frac{a_1 x_E + a_2 (x_E C_2 + y_E S_2)}{x_E^2 + y_E^2} \\ \sin(q_1) = \frac{a_1 y_E + a_2 (y_E C_2 - x_E S_2)}{x_E^2 + y_E^2} \end{cases}$$

Như vậy

$$\begin{cases} q_1 = \arctan 2(\sin(q_1), \cos(q_1)) \\ q_2 = \arctan 2(\sin(q_2), \cos(q_2)) \end{cases}$$

#### 7.4. Thiết lập quỹ đạo chuyển động

Bài toán thiết kế quỹ đạo chuyển động là xây dựng quy luật chuyển động cho các khâu của robot đảm bảo thỏa mãn yêu cầu về vị trí, hướng, hoặc thỏa mãn cả vị trí và hướng của khâu thao tác trong không gian theo thời gian. Bài toán yêu cầu xác định đường biểu diễn vị trí của khớp (góc quay của các khớp quay hoặc khoảng tịnh tiến của các khớp tịnh tiến) theo thời gian, khi di chuyển từ vị trí ban đầu  $q_0$  đến vị trí cuối cùng  $q_e$  trong khoảng thời gian  $t_e$ , với  $q$  là biến khớp tổng quát. Từ vị trí ban đầu và hướng của cơ cấu robot, sử dụng phương trình động học ngược, ta

xác định được các giá trị biến khớp tương ứng. Quỹ đạo di chuyển cần thoả mãn các yêu cầu điều kiện đầu và cuối.

Điều kiện đầu và điều kiện cuối là các điều kiện về vị trí, vận tốc và gia tốc khi bắt đầu và kết thúc một chu trình làm việc của robot. Thông thường ta sẽ chọn các điều kiện này bằng 0.

Đối với Robot phục vụ công việc hàn này, ta chọn bài toán thiết kế quỹ đạo trong không gian thao tác sao cho quỹ đạo của điểm tác động cuối là đường thẳng từ điểm A đến điểm B (bất kỳ trong không gian làm việc) trong thời gian xác định, sao cho thoả mãn 4 điều kiện: vị trí đầu và vị trí cuối, vận tốc tại vị trí đầu và vị trí cuối. Với điểm A ( $x_A, y_A, z_A$ ) và điểm B ( $x_B, y_B, z_B$ ), ta có phương trình đường thẳng trong không gian thao tác:

$$\frac{x - x_A}{x_B - x_A} = \frac{y - y_A}{y_B - y_A} = \frac{z - z_A}{z_B - z_A}$$

Sử dụng tham số  $s$  biểu diễn tọa độ dài của các điểm trên đường thẳng, khi đó phương trình đường thẳng được biểu diễn dưới dạng tham số:

$$\begin{cases} x = \frac{x_B - x_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}} s \\ y = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} x + \frac{y_A x_B - y_B x_A}{x_B - x_A} \\ z = \frac{z_B - z_A}{x_B - x_A} x + \frac{z_A x_B - z_B x_A}{x_B - x_A} \end{cases}$$

Sử dụng prophin vận tốc quỹ đạo dạng hình thang. Prophin vận tốc quỹ đạo dạng hình thang là dạng quan trọng đặc biệt, bởi vì dạng này hay được sử dụng trong kỹ thuật do tính chất dễ thực hiện của nó. Nhược điểm cơ bản của prophin vận tốc dạng hình thang là sự diễn biến gia tốc của đại lượng này không liên tục.

Với quy luật vận tốc hình thang, quá trình Robot làm việc theo quỹ đạo có thể chia làm 3 giai đoạn:

Giai đoạn 1: Vận tốc tăng từ không đến giá trị ổn định làm việc, gia tốc  $a_1 = a_0$

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + 0.5a_0(t - t_0)^2 \\ v(t) = a_0(t - t_0) \quad t_0 \leq t \leq t_1 \\ a(t) = a_0 \end{cases}$$

Giai đoạn 2: Vận tốc không đổi trong quá trình thao tác

$$\begin{cases} s(t) = s_1 + v(t - t_1) \\ v(t) = v \\ a(t) = 0 \end{cases} \quad t_1 \leq t \leq t_2$$

Giai đoạn 3: Vận tốc giảm dần về 0

$$\begin{cases} s(t) = s_2 + v(t - t_2) + 0.5a_e(t - t_2)^2 \\ v(t) = v + a_e(t - t_2) \\ a(t) = a_e \end{cases} \quad t_2 \leq t \leq t_e$$

Với điều kiện biên tại hai điểm đầu và cuối, các điểm chuyển tiếp và quỹ đạo chuyển động theo thời gian được xác định:

$$t_0 \leq t \leq t_1$$

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + 0.5a_0(t - t_0)^2 \\ v(t) = a_0(t - t_0) \\ a(t) = a_0 \end{cases}$$

$$t_1 \leq t \leq t_2$$

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + 0.5a_0(t_1 - t_0)^2 + a_0(t_1 - t_0)(t - t_1) \\ v(t) = a_0(t_1 - t_0) \\ a(t) = 0 \end{cases}$$

$$t_2 \leq t \leq t_e$$

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + 0.5a_0(t_1 - t_0)^2 + a_0(t_1 - t_0)(t_2 - t_1) + v(t - t_2) + 0.5a_e(t - t_2)^2 \\ v(t) = a_0(t_1 - t_0) + a_e(t - t_2) \\ a(t) = a_e \end{cases}$$

Giả sử: Thiết kế quỹ đạo chuyển động trong không gian thao tác cho Robot, sao cho điểm tác động cuối di chuyển từ điểm A(125, 50, 35) đến điểm B (625,50, 35) với quỹ đạo là đường thẳng.

Thiết kế theo quỹ đạo vận tốc hình thang cân.

Thay tọa độ của điểm A và điểm B, ta có phương trình tham số của đường thẳng AB:

$$\begin{cases} x = s \\ y = 50 \\ z = 35 \end{cases}$$

Chọn quỹ đạo vận tốc hình thang với các điều kiện biên như sau:

Tại thời điểm bắt đầu (điểm A):  $s_0 = 125\text{mm}$ ,  $v_0 = 0\text{mm/s}$ ,  $t_0 = 0$

Tại thời điểm kết thúc (điểm B):  $s_e = 625\text{mm}$ ,  $v_e = 0\text{mm/s}$

Vận tốc của điểm tác động cuối trong quá trình gia công được chọn:  $v_1 = v_2 = 32\text{mm/s}$

Suy ra:  $a_0 t_1 = 32\text{mm/s}$

Chọn  $t_1 = 4\text{s}$  hay  $t_1 - t_0 = 4$

$a_a = 8\text{mm/s}^2$

Quy luật vận tốc hình thang cân

$$\begin{cases} t_e - t_2 = 4 \\ a_e = -a_0 = -8\text{mm/s}^2 \end{cases}$$

Thời gian chạy trong quá trình gia công

$$t_2 - t_1 = \frac{s_2 - s_1}{a_0 t_1} = \frac{625 - 125 - 0.5 \cdot 8 \cdot 4^2}{32} = 13.625$$

Thời điểm kết thúc quá trình

$$t_e = 4 + 4 + 13.625 = 21.625$$

Vậy phương trình chuyển động của điểm tác động cuối

$$\begin{cases} x = s \\ y = 50 \\ z = 35 \end{cases}$$

Trong khoảng thời gian  $0 \leq t \leq 4\text{s}$

$$\begin{cases} s(t) = 125 + 4t^2 \\ v(t) = 8t \\ a(t) = 8 \end{cases}$$

Trong khoảng thời gian  $4 \leq t \leq 17.625\text{s}$

$$\begin{cases} s(t) = 189 + 32(t - 4) \\ v(t) = 32 \\ a(t) = 0 \end{cases}$$

Trong khoảng thời gian  $17.625 \leq t \leq 21.625$  s

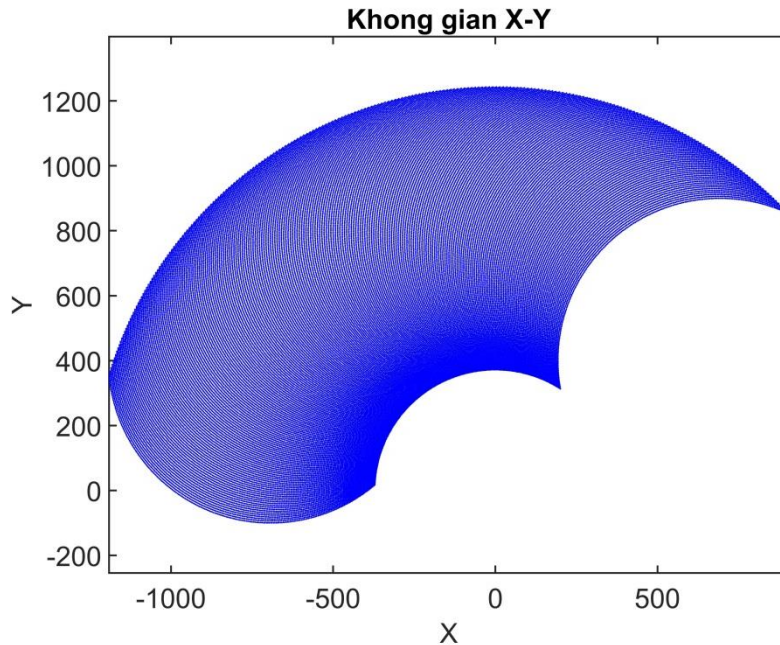
$$\begin{cases} s(t) = 625 + 32(t - 17.625) - 4(t - 17.625)^2 \\ v(t) = 32 - 8(t - 17.625) \\ a(t) = -8 \end{cases}$$

7.5. *Không gian làm việc của robot*

Các thông số của robot như sau:

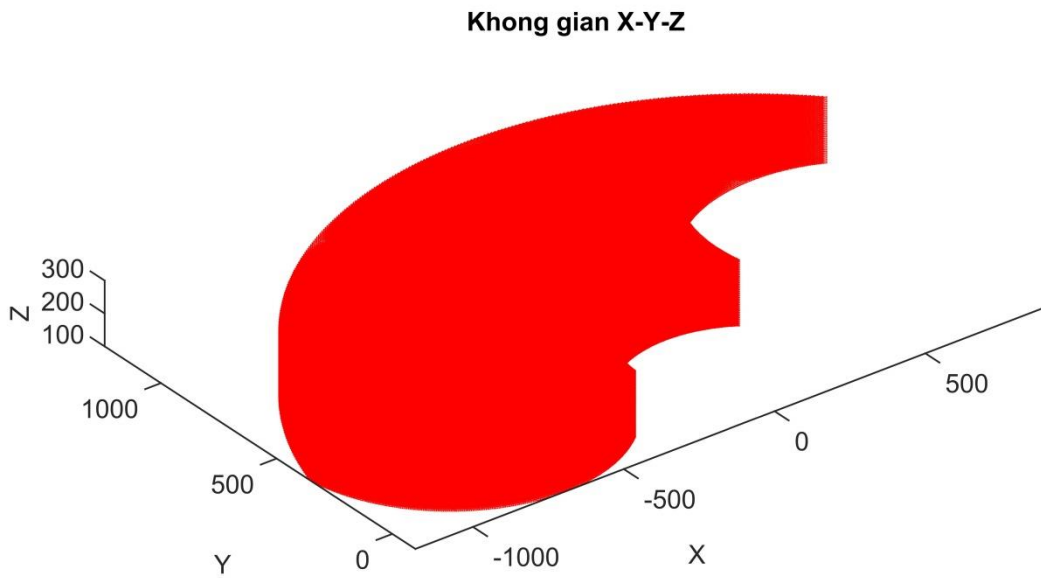
- Chiều dài khâu 1:  $a_1 = 0.8\text{m}$
- Chiều dài khâu 2:  $a_2 = 0.5\text{m}$
- Giới hạn biến khớp 1:  $\theta_1$  [min =  $30^\circ$ , max =  $150^\circ$ ]
- Giới hạn biến khớp 2:  $\theta_2$  [min =  $35^\circ$ , max =  $160^\circ$ ]
- Giới hạn biến khớp 3:  $d_3$  [min = 0.2, max = 0.6]

Không gian làm việc nhận được như sau



Hình 2. Không gian làm việc Oxy





Hình 3. Không gian làm việc Oxyz

7.6. Thiết lập phương trình động lực học

7.6.1. Ma trận Jacobi tịnh tiến và Jacobi quay của các khâu

Chọn tọa độ suy rộng

$$\mathbf{q} = \theta_1, \theta_2, d_3 \quad \mathbf{T} = q_1, q_2, q_3 \quad \mathbf{T}$$

Bảng mô tả vị trí trọng tâm, khối lượng, mô men quán tính khối của từng khâu của robot:

Khâu	Vị trí trọng tâm (so với gốc toạ độ gắn trên mỗi khớp)			Khối lượng	Mô men quán tính khối từng khâu					
	$x_C$	$y_C$	$z_C$		$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$	$I_{xy}$	$I_{xz}$	$I_{yz}$
1	$\frac{-a_1}{2}$	0	0	$m_1$	$I_{1x}$	$I_{1y}$	$I_{1z}$	0	0	0
2	$\frac{-a_2}{2}$	0	0	$m_2$	$I_{2x}$	$I_{2y}$	$I_{2z}$	0	0	0
3	0	0	$\frac{-q_3}{2}$	$m_3$	$I_{3x}$	$I_{3y}$	$I_{3z}$	0	0	0

Các khâu là đối xứng và là những thanh đồng chất nên  $I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$  của các khâu bằng 0.

Vector xác định vị trí của các điểm  $O_1, O_2, O_3$  trong hệ tọa độ cơ sở lần lượt là

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{r}_{O_1} &= a_1 C_1 \quad a_1 S_1 \quad 0^T \\ {}^0\mathbf{r}_{O_2} &= -a_2 C_{12} + a_1 C_1 \quad a_2 S_{12} + a_1 S_1 \quad 0^T \\ {}^0\mathbf{r}_{O_3} &= a_2 C_{12} + a_1 C_1 \quad a_2 S_{12} + a_1 S_1 \quad q_3^T \end{aligned}$$

Vector xác định khối tâm các khâu trong hệ tọa độ gắn với khâu lần lượt là

$$\begin{aligned} {}^1\mathbf{r}_{C_1} &= \left[ \frac{-a_1}{2} \quad 0 \quad 0 \right]^T \\ {}^2\mathbf{r}_{C_2} &= \left[ \frac{-a_2}{2} \quad 0 \quad 0 \right]^T \\ {}^3\mathbf{r}_{C_3} &= \left[ 0 \quad 0 \quad \frac{-q_3}{2} \right]^T \end{aligned}$$

• Xét khâu 1

Vị trí khối tâm của khâu 1 trong hệ tọa độ cố định

$$\mathbf{r}_{C_1} = {}^0\mathbf{r}_{O_1} + {}^0\mathbf{R}_1 {}^1\mathbf{r}_{C_1} = \begin{bmatrix} a_1 C_1 \\ a_1 S_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{2} C_1 \\ \frac{a_1}{2} S_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Vận tốc khối tâm khâu thứ nhất

$$\mathbf{v}_{C_1} = \dot{\mathbf{r}}_{C_1} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{2} \dot{q}_1 S_1 \\ \frac{a_1}{2} \dot{q}_1 C_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ma trận Jacobi tịnh tiến của khâu thứ nhất

$$\mathbf{J}_{T_1} = \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{2} \sin(q_1) & 0 & 0 \\ \frac{a_1}{2} \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{J}_{T_1}^T = \begin{bmatrix} \frac{-a_1}{2} \sin(q_1) & \frac{a_1}{2} \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ma trận Jacobi quay của khâu thứ nhất

$$\boldsymbol{\omega}_1 = 0 \quad 0 \quad \dot{q}_1^T$$

$$\Rightarrow \mathbf{J}_{R_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{J}_{R_1}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

• Xét khâu 2

Vị trí khối tâm của khâu 2 trong hệ tọa độ cố định

$$\mathbf{r}_{C_2} = {}^0\mathbf{r}_{O_2} + {}^0\mathbf{R}_{2,2} \cdot \mathbf{r}_{C_2} = \begin{bmatrix} -a_2 C_{12} + a_1 C_1 \\ a_2 S_{12} + a_1 S_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 \\ S_{12} & C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-a_2}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-3a_2}{2} C_{12} + a_1 C_1 \\ \frac{a_2}{2} S_{12} + a_1 S_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Vận tốc khối tâm khâu thứ hai

$$\mathbf{v}_{C_2} = \dot{\mathbf{r}}_{C_2} = \begin{bmatrix} -a_1 \dot{q}_1 S_1 - \frac{3a_2}{2} \dot{q}_{12} S_{12} \\ a_1 \dot{q}_1 C_1 + \frac{a_2}{2} \dot{q}_{12} C_{12} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ma trận Jacobi tịnh tiến của khâu thứ hai

$$\mathbf{J}_{T_2} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} a_2 \sin(q_1 + q_2) - a_1 \sin(q_1) & \frac{3}{2} a_2 \sin(q_1 + q_2) & 0 \\ \frac{1}{2} a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_1 \cos(q_1) & \frac{1}{2} a_2 \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{T_2}^T = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} a_2 \sin(q_1 + q_2) - a_1 \sin(q_1) & \frac{1}{2} a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_1 \cos(q_1) & 0 \\ \frac{3}{2} a_2 \sin(q_1 + q_2) & \frac{1}{2} a_2 \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ma trận Jacobi quay của khâu thứ hai

$$\boldsymbol{\omega}_2 = 0 \quad 0 \quad \dot{q}_1 + \dot{q}_2^T$$

$$\Rightarrow \mathbf{J}_{R_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{J}_{R_2}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

• Xét khâu 3

Vị trí khối tâm của khâu 3 trong hệ tọa độ cố định

$$\mathbf{r}_{C_3} = {}^0\mathbf{r}_{O_3} + {}^0\mathbf{R}_3 {}^3\mathbf{r}_{C_3} = \begin{bmatrix} a_2 C_{12} + a_1 C_1 \\ a_2 S_{12} + a_1 S_1 \\ q_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 \\ S_{12} & C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-q_3}{2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} a_1 C_1 + a_2 C_{12} \\ a_1 S_1 + a_2 S_{12} \\ \frac{a_3}{2} \end{bmatrix}$$

Vận tốc khối tâm khâu thứ ba

$$\mathbf{v}_{C_3} = \dot{\mathbf{r}}_{C_3} = \begin{bmatrix} -a_1 \dot{q}_1 S_1 - a_2 \dot{q}_{12} S_{12} \\ a_1 \dot{q}_1 C_1 + a_2 \dot{q}_{12} C_{12} \\ \frac{\dot{q}_3}{2} \end{bmatrix}$$

Ma trận Jacobi tịnh tiến của khâu thứ ba

$$\mathbf{J}_{T_3}^T = \begin{bmatrix} -a_2 S_{12} - a_1 S_1 & a_2 C_{12} + a_1 C_1 & 0 \\ -a_2 S_{12} & a_2 C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Ma trận Jacobi quay của khâu thứ ba

$$\boldsymbol{\omega}_3 = \boldsymbol{\omega}_2 = 0 \quad 0 \quad \dot{q}_1 + \dot{q}_2^T$$

$$\Rightarrow \mathbf{J}_{R_3} = \mathbf{J}_{R_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{J}_{R_3}^T = \mathbf{J}_{R_2}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

**7.6.2. Ma trận tenxơ quán tính của các khâu**

Các ma trận tenxơ quán tính của các khâu, tính với hệ trục tọa độ địa phương đặt tại trọng tâm từng khâu và có các trục song song với hệ trục tọa độ khớp  $O_i x_i y_i z_i$  có dạng như sau

$$\mathbf{I}_1^1 = \begin{bmatrix} J_{1xx} & J_{c1xy} & J_{c1xz} \\ J_{c1yx} & J_{c1yy} & J_{c1yz} \\ J_{c1zx} & J_{c1zy} & J_{c1zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1z} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_2^2 = \begin{bmatrix} J_{c2xx} & J_{c2xy} & J_{c2xz} \\ J_{c2yx} & J_{c2yy} & J_{c2yz} \\ J_{c2zx} & J_{c2zy} & J_{c2zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{2y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{2z} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_3^3 = \begin{bmatrix} J_{c3xx} & J_{c3xy} & J_{c3xz} \\ J_{c3yx} & J_{c3yy} & J_{c3yz} \\ J_{c3zx} & J_{c3zy} & J_{c3zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{3x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{3y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{3z} \end{bmatrix}$$

**7.6.3. Ma trận khối lượng suy rộng của các khâu**

$$\mathbf{M}_{(q)} = \sum_{i=1}^3 (m_i \mathbf{J}_{T_i}^T \mathbf{J}_{T_i} + \mathbf{J}_{R_i}^T \mathbf{I}_i \mathbf{J}_{R_i}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$Mq := \left[ \left[ \frac{m1a_1^2}{4} + I1z + m2 \left( \frac{1}{4} a_2^2 + a_2 C2 a_1 + a_1^2 \right) + I2z + m3 \left( 2 a_2 C2 a_1 + a_1^2 + a_2^2 \right) + I3z, \frac{m2 a_2 (2 C2 a_1 + a_2)}{4} + I2z + m3 a_2 (C2 a_1 + a_2) + I3z, 0 \right], \left[ \frac{m2 a_2 (2 C2 a_1 + a_2)}{4} + I2z + m3 a_2 (C2 a_1 + a_2) + I3z, \frac{1}{4} m2 a_2^2 + I2z + m3 a_2^2 + I3z, 0 \right], \left[ 0, 0, \frac{m3}{4} \right] \right]$$

$$m11 := \frac{m1 a_1^2}{4} + I1z + m2 \left( \frac{1}{4} a_2^2 + a_2 C2 a_1 + a_1^2 \right) + I2z + m3 \left( 2 a_2 C2 a_1 + a_1^2 + a_2^2 \right) + I3z$$

$$m12 := \frac{m2 a_2 (2 C2 a_1 + a_2)}{4} + I2z + m3 a_2 (C2 a_1 + a_2) + I3z$$

$$m13 := 0$$

$$m21 := \frac{m2 a_2 (2 C2 a_1 + a_2)}{4} + I2z + m3 a_2 (C2 a_1 + a_2) + I3z$$

$$m22 := \frac{1}{4} m2 a_2^2 + I2z + m3 a_2^2 + I3z$$

$$m23 := 0$$

$$m31 := 0$$

$$m32 := 0$$

$$m33 := \frac{m3}{4}$$

#### 7.6.4. Lực quán tính Corlolis và quán tính ly tâm

Ma trận  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  là ma trận chứa các lực Corlolis và lực ly tâm. Các phần tử trong ma trận được xác định bởi công thức

$$c_j = \sum_{k,l=1}^3 (k,l;j) \cdot \dot{q}_k \cdot \dot{q}_l$$

$$(k,l;j) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial m_{kj}}{\partial q_j} + \frac{\partial m_{lj}}{\partial q_k} - \frac{\partial m_{kl}}{\partial q_j} \right)$$

Với  $m_{ij}$  là các phần tử trong ma trận khối lượng.

$$\Rightarrow C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

Các phần tử sau khi tính toán

$$c_{11} := (-m_2 S_2 a_1 a_2 - 2 m_3 S_2 a_1 a_2) dq_2$$

$$c_{12} := \left( -\frac{1}{2} m_2 S_2 a_1 a_2 - m_3 S_2 a_1 a_2 \right) dq_2$$

$$c_{13} := 0$$

$$c_{21} := \left( \frac{1}{2} m_2 S_2 a_1 a_2 + m_3 S_2 a_1 a_2 \right) dq_1 + \left( -\frac{1}{4} m_2 S_2 a_1 a_2 - \frac{1}{2} m_3 S_2 a_1 a_2 \right) dq_2$$

$$c_{22} := \left( \frac{1}{4} m_2 S_2 a_1 a_2 + \frac{1}{2} m_3 S_2 a_1 a_2 \right) dq_1$$

$$c_{23} := 0$$

$$c_{31} := 0$$

$$c_{32} := 0$$

$$c_{33} := 0$$

#### 7.6.5. Lực suy rộng của các lực có thế

Thế năng của robot

$$\pi = \frac{m_1 a_1 S_1}{2} g + m_2 \left( \frac{1}{2} a_2 S_{12} + a_1 S_1 \right) g + m_3 (a_2 S_{12} + a_1 S_1) g$$

Đạo hàm riêng thế năng  $\pi$  theo  $q_i$  ta có các phần tử của ma trận biểu diễn lực suy rộng của các lực có thế như sau

$$g_i = \frac{\partial \pi}{\partial q_i}$$

$$g_1 = \frac{m_1 a_1 C_1}{2} g + m_2 \left( \frac{1}{2} a_2 C_{12} + a_1 C_1 \right) g + m_3 (a_2 C_{12} + a_1 C_1) g$$

$$g_2 = m_2 \left( \frac{1}{2} a_2 C_{12} \right) g + m_3 (a_2 C_{12}) g$$

$$g_3 = 0$$



Khi đó ta có phương trình vi phân chuyển động của robot

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 := & \left( \frac{m_1 a_1^2}{4} + I_1 z + m_2 \left( \frac{1}{4} a_2^2 + a_2 C_2 a_1 + a_1^2 \right) + I_2 z + m_3 \left( 2 a_2 C_2 a_1 \right. \right. \\ & \left. \left. + a_1^2 + a_2^2 \right) + I_3 z \right) ddq_1 + \left( \left( \frac{1}{2} a_2 C_2 a_1 + \frac{1}{4} a_2^2 \right) m_2 + \left( a_2 C_2 a_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. a_2^2 \right) m_3 + I_2 z + I_3 z \right) ddq_2 + \left( -m_2 a_2 S_2 a_1 - 2 m_3 a_2 S_2 a_1 \right) dq_2 dq_1 + \left( \right. \\ & \left. -\frac{1}{2} m_2 a_2 S_2 a_1 - m_3 a_2 S_2 a_1 \right) dq_2^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_2 := & \left( \left( \frac{1}{2} a_2 C_2 a_1 + \frac{1}{4} a_2^2 \right) m_2 + \left( a_2 C_2 a_1 + a_2^2 \right) m_3 + I_2 z + I_3 z \right) ddq_1 \\ & + \left( \frac{1}{4} m_2 a_2^2 + I_2 z + m_3 a_2^2 + I_3 z \right) ddq_2 + \left( \left( \frac{1}{2} m_2 a_2 S_2 a_1 \right. \right. \\ & \left. \left. + m_3 a_2 S_2 a_1 \right) dq_1 + \left( -\frac{1}{4} m_2 a_2 S_2 a_1 - \frac{1}{2} m_3 a_2 S_2 a_1 \right) dq_2 \right) dq_1 \\ & + \left( \frac{1}{4} m_2 a_2 S_2 a_1 + \frac{1}{2} m_3 a_2 S_2 a_1 \right) dq_1 dq_2 \end{aligned}$$

$$\tau_3 := \frac{m_3 ddq_3}{4}$$

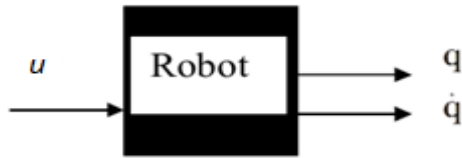
## 7.7. Tổng quan về thiết kế bộ điều khiển

### 7.7.1. Lực suy rộng của các lực có thể

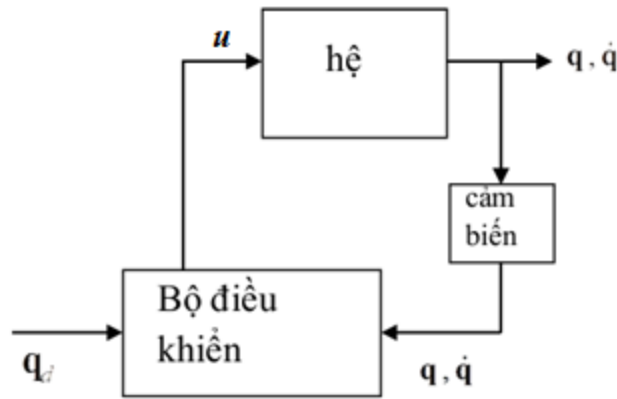
Nhiệm vụ của bài toán điều khiển là thiết kế bộ điều khiển để robot chạy đúng theo quy luật  $\mathbf{q}_d(t)$  cho trước, nhằm thực hiện một số nhiệm vụ nào đó. Trên cơ sở chuyển động mong muốn  $\mathbf{q}_d(t)$  được định nghĩa trước và chuyển động hiện tại của robot được đo bởi các cảm biến đặt tại khớp, bộ điều khiển có nhiệm vụ điều khiển robot đi theo một quỹ đạo cho trước. Đồng thời làm cho robot thực hiện chuyển động mong muốn một cách ổn định và chính xác. Trong phần trên, ta đã có phương trình vi phân chuyển động của robot

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}(t)$$

Để điều khiển chuyển động của robot trong không gian làm việc, cần xác định thành phần lực của vector lực  $\boldsymbol{\tau}(t)$  để cho chuyển động  $\mathbf{q}(t)$  gần hay trùng với chuyển động mong muốn, ta có thể xem robot công nghiệp như một hệ thống mà có đầu vào là điện áp tại các động cơ và đầu ra là chuyển động của các khớp mà ta có thể đo được nhờ các sensor đặt tại các khớp tương ứng.



Phần điều khiển và robot được tích hợp theo sơ đồ sau



Hình 4. Sơ đồ điều khiển

Với sơ đồ này người sử dụng robot chỉ việc định nghĩa quỹ đạo mong muốn rồi sau đó robot sẽ tự động thực hiện chuyển động đó.

#### 7.7.2. Mô phỏng trên Matlab

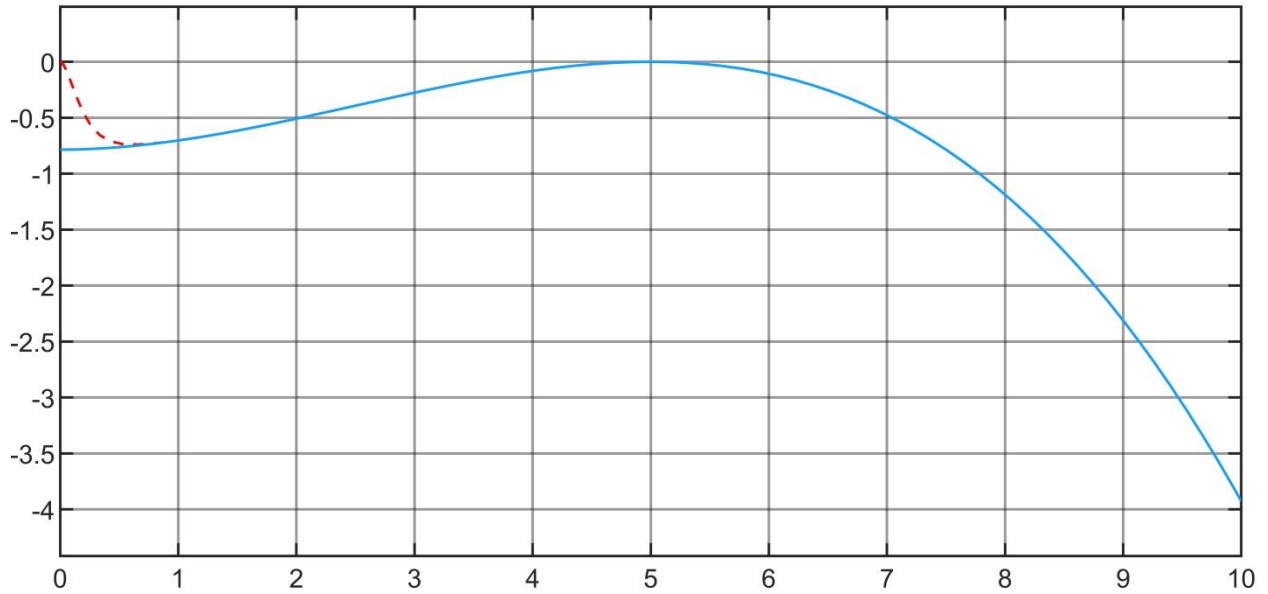
Điều khiển bám quỹ đạo

Mô phỏng điều khiển robot theo quỹ đạo

$$\begin{cases} q_1 = \frac{-\pi}{4} + \frac{\pi}{100}t^2 - \frac{\pi}{250}t^3 \\ q_2 = \frac{-\pi}{3} + \frac{\pi}{100}t^2 - \frac{\pi}{500}t^3 \\ q_3 = 0.5t + 10 \end{cases}$$

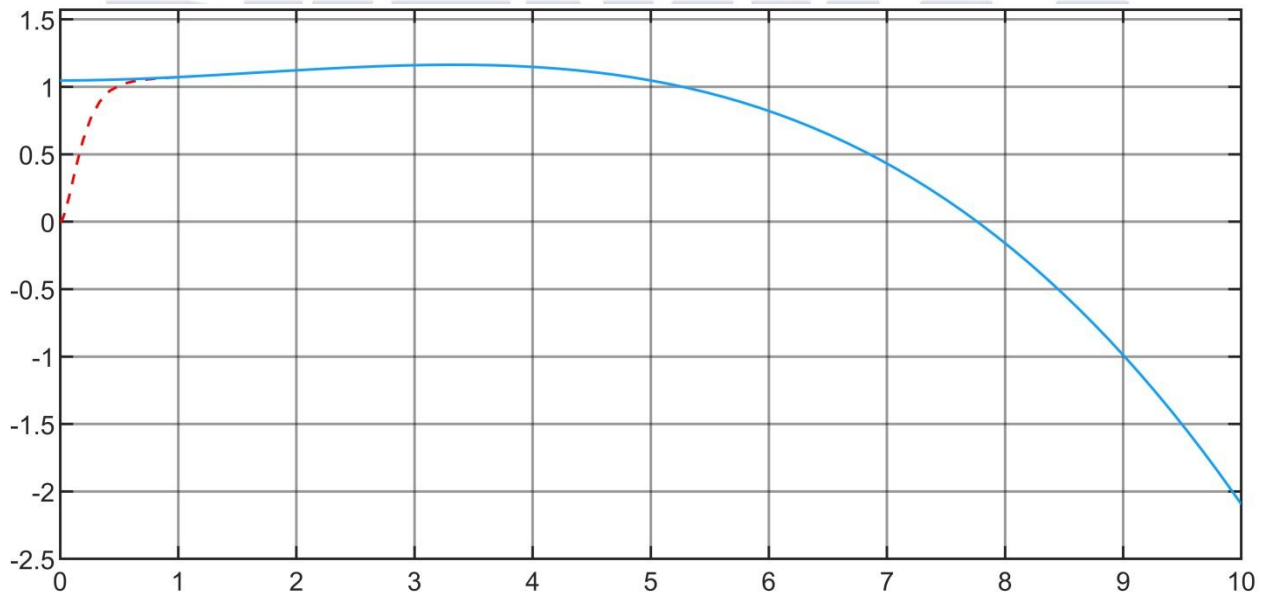
Sau khi mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink, ta thu được kết quả như sau:

- Vị trí của các biên khớp so với vị trí đặt
- Vị trí của  $q_1$  so với  $q_{1d}$  theo thời gian



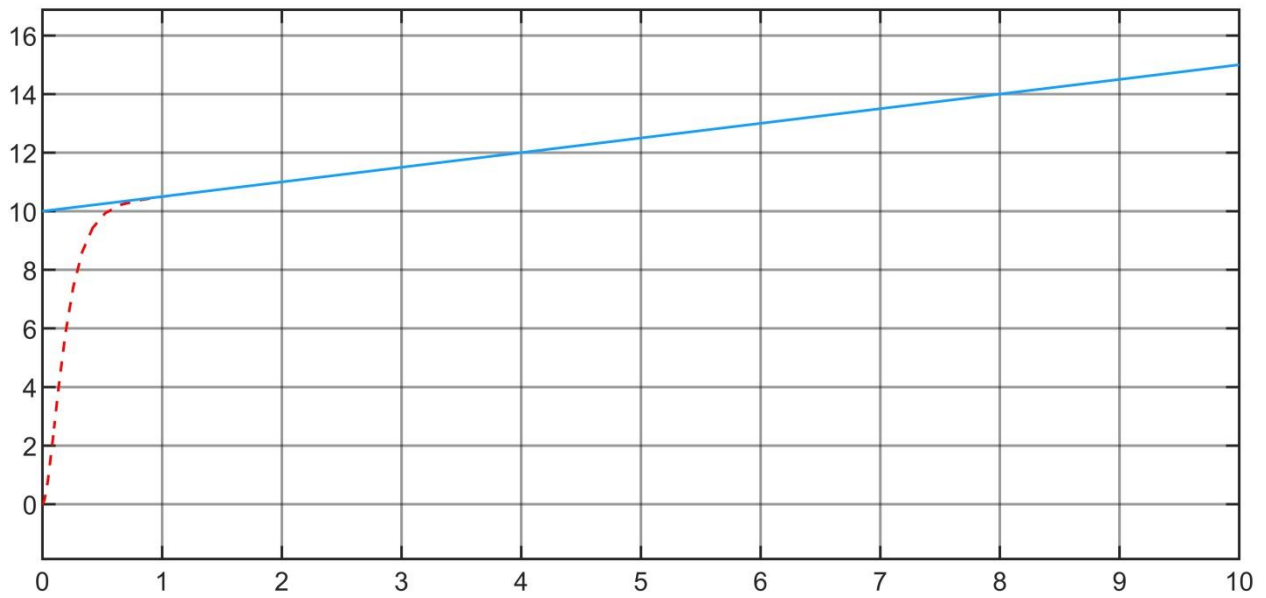
Hình 5. Đồ thị  $q_1, q_{1d}$  theo thời gian

- Vị trí của  $q_2$  so với  $q_{2d}$  theo thời gian



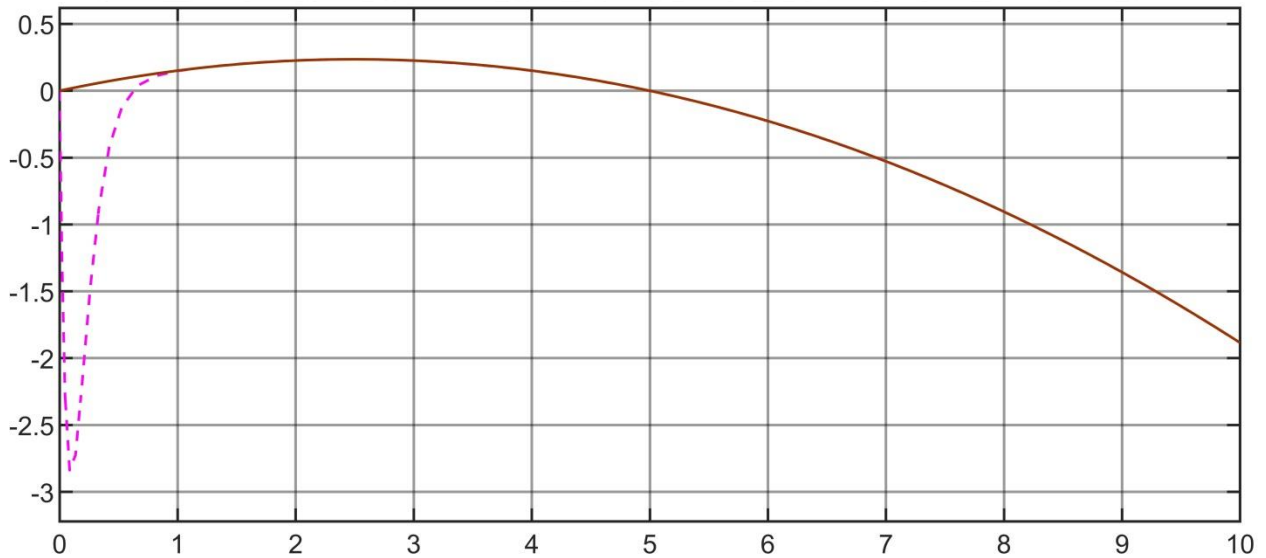
Hình 6. Đồ thị  $q_2, q_{2d}$  theo thời gian

- Vị trí của  $q_3$  so với  $q_{3d}$  theo thời gian

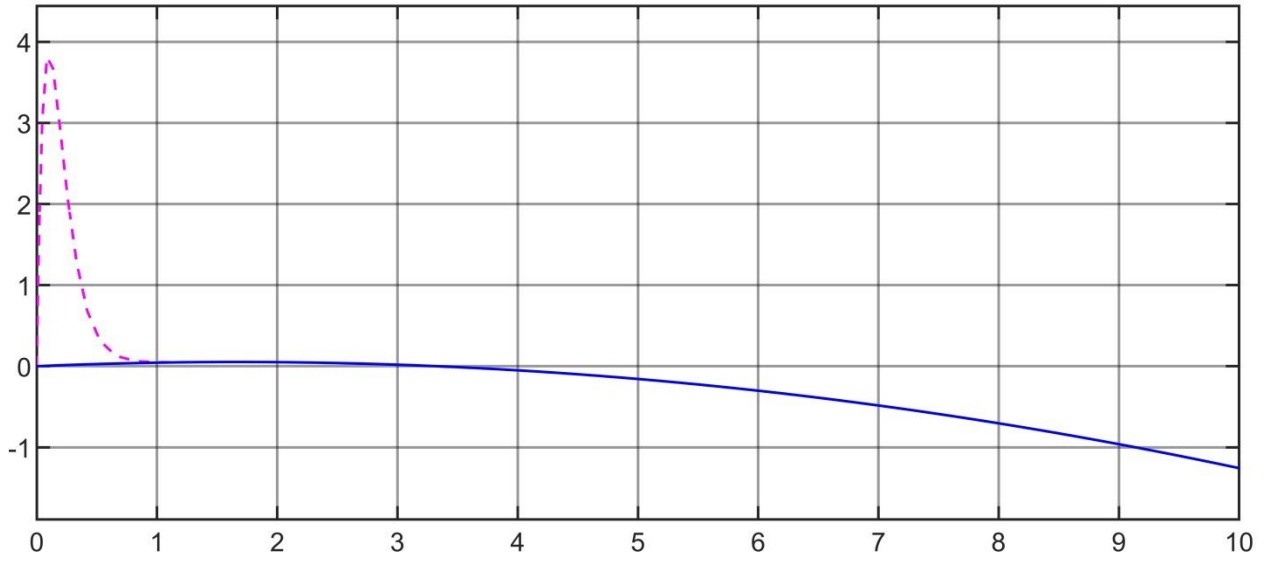


Hình 7. Đồ thị  $q_3, q_{3d}$  theo thời gian

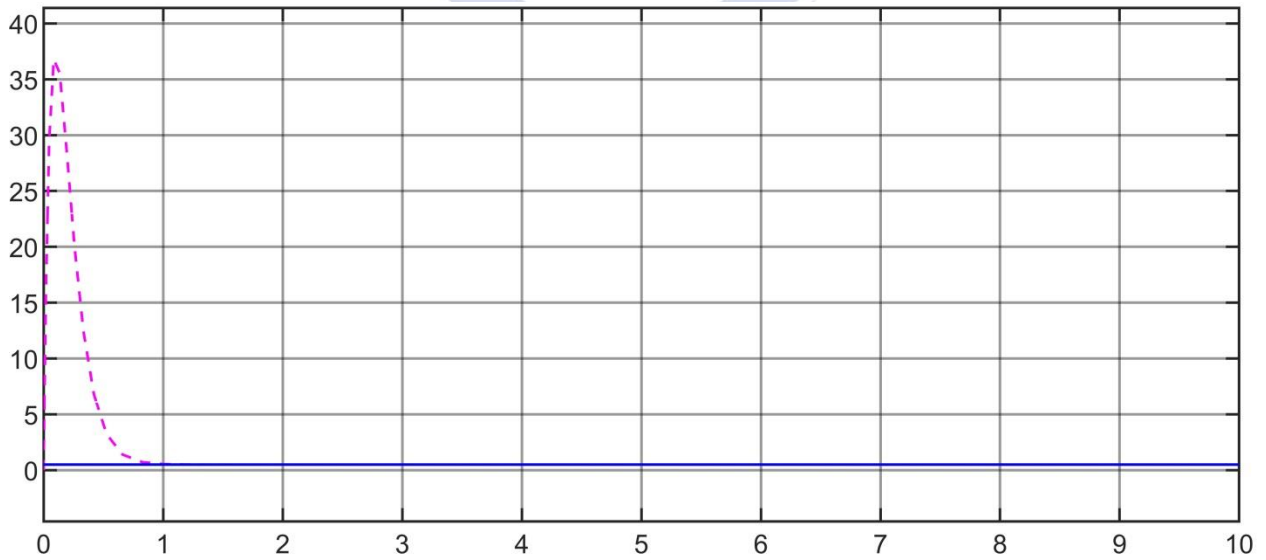
- Vận tốc của các biến khớp so với vận tốc đặt
- Vận tốc  $dq_1$  so với  $dq_{1d}$  theo thời gian



Hình 8. Đồ thị  $dq_1, dq_{1d}$  theo thời gian



Hình 9. Đồ thị  $dq_2, dq_{2d}$  theo thời gian



Hình 10. Đồ thị  $dq_3, dq_{3d}$  theo thời gian

## 8. Kết quả và thảo luận

- Các biến khớp có xu hướng bám theo quỹ đạo đã đặt trước sau khoảng thời gian  $t = 1.025s$ .
  - Vận tốc các biến khớp có xu hướng bám theo quỹ đạo đã đặt trước sau khoảng thời gian  $t = 1.025 s$ .
- Như vậy, bài toán điều khiển đã được giải quyết.

## 9. Phân tích rủi ro

### 9.1.1. Quy trình đánh giá rủi ro

Các quy trình phân tích rủi ro thường được phân chia thành hai nhóm, phân tích định lượng và phân tích định tính. Có thể nhận thấy rằng phân tích định tính sẽ giúp đưa ra những thông tin cụ thể và chi tiết cho bài toán đặt ra. Tuy nhiên, việc sử dụng phương pháp này đòi hỏi có những hàm toán học và tối ưu phức tạp, cũng như các phần mềm tính toán chuyên dụng. Do đó, các phân tích định lượng là chưa phù hợp và không cần thiết trong trường hợp này.

Các phân tích rủi ro định tính có nhiều ưu điểm như tiện lợi, nhanh chóng và đưa ra những phân tích nhanh gọn, không cần những hàm toán học và những phần mềm phức tạp. Do đó, đây là kỹ thuật được lựa chọn để thực hiện các phân tích rủi ro trong bài toán này.

Quy trình phân tích rủi ro định tính bao gồm các bước sau

- Xác định các yếu tố rủi ro;
- lựa chọn thang đo xác suất;
- thiết lập ma trận tham chiếu rủi ro;
- xác định điểm rủi ro và ma trận rủi ro;
- xếp hạng rủi ro.

### 9.1.2. Xác định các yếu tố rủi ro

**Bảng 9.1.** Các yếu tố rủi ro

Ri	Yếu tố rủi ro
R1	Sử dụng thiết bị không đúng cách
R2	Sử dụng thiết bị bởi người không được phép
R3	Không tuân theo hướng dẫn sử dụng thiết bị
R4	Sử dụng thiết bị chưa được hiệu chuẩn
R5	Nhiệt độ không phù hợp
R6	Độ ẩm cao
R7	Đặt thiết bị trong không gian quá nhỏ
R8	Không tuân thủ thứ tự hoạt động

### 9.1.3. Lựa chọn thang đo xác suất và thang đo tác động

Sau khi các yếu tố rủi ro được xác định, quy trình tiếp theo là lựa chọn thang đo xác suất và thang đo tác động. Thang đo xác suất được hiểu là Khả năng xảy ra rủi ro do yếu tố xem xét gây ra, theo thời gian.

**Bảng 9.2.** Lựa chọn thang đo xác suất.

Đánh giá xác suất định tính	Đánh giá xác suất định lượng	Điểm xác suất
Rất cao (rất có thể xảy ra)	3 tháng một lần	<b>5</b>
Cao (có thể xảy ra)	6 tháng một lần	<b>4</b>
Vừa phải	Mỗi năm một lần	<b>3</b>
Thấp (không chắc)	3 năm một lần	<b>2</b>
Rất thấp (rất khó xảy ra)	Hơn 3 năm	<b>1</b>

Bên cạnh đó, thang đo tác động cũng được lựa chọn. Thang đo tác động được miêu tả là tác động xảy ra đối với thiết bị khi yếu tố rủi ro xem xét xảy ra. Cần chú ý rằng một yếu tố rủi ro có khả năng xảy ra cao, nhưng chưa chắc đã có những tác động lớn tới thiết bị, và ngược lại. Bảng 9.3 thể hiện lựa chọn thang đo tác động trong trường hợp này.

**Bảng 9.3.** Lựa chọn thang đo tác động.

Đánh giá tác động định tính	Đánh giá tác động định lượng	Điểm tác động
Rất cao	Số lượng bài kiểm tra không hợp lệ lớn hơn 20%	<b>20</b>
Cao	Số lượng bài kiểm tra không hợp lệ từ 10 đến 20%	<b>10</b>
Vừa phải	Số lượng bài kiểm tra không hợp lệ từ 5 đến 10%	<b>5</b>
Thấp	Số lượng bài kiểm tra không hợp lệ từ 2 đến 5%	<b>2</b>
Rất thấp	Các thử nghiệm không hợp lệ thấp hơn 1%	<b>1</b>

#### 9.1.4. Thiết lập ma trận tham chiếu rủi ro

Ma trận tham chiếu rủi ro được tính toán từ hai thang đo xác suất và tác động được lựa chọn ở mục 9.1.3. Ma trận được trình bày chi tiết ở Bảng 9.4. Có thể nhận thấy rằng các hàng của ma trận được trình bày theo thang đo xác suất. Các cột của ma trận được trình bày theo thang đo tác động. Các thang này được sắp xếp từ số thấp tới cao.

Việc tính toán các thành phần bên trong ma trận rất đơn giản, là tích số tương ứng của điểm xác suất và điểm tác động. Có thể nhận thấy rằng điểm tác động càng cao và điểm xác suất càng cao, thì tích số sẽ càng lớn và do đó điểm rủi ro sẽ càng lớn.

Tiếp theo, để xếp loại các điểm rủi ro, nhằm phát hiện xem những yếu tố nào là nguy hiểm, người ta sử dụng Bảng 9.5. Từ các xếp loại và màu sắc đánh dấu trong Bảng 9.5, ma trận tham chiếu rủi ro được thể hiện trực quan như hình 9.4.

**Bảng 9.4.** Ma trận tham chiếu rủi ro.

Ma trận tham chiếu rủi ro (SR)			Tác động (mức độ nghiêm trọng)				
			Rất thấp	Thấp	Vừa phải	Cao	Rất cao
			1	2	5	10	20
<b>Xác suất</b>	Rất thấp (rất khó xảy ra)	1	1	2	5	10	20
	Thấp (không chắc)	2	2	4	10	20	40
	Vừa phải	3	3	6	15	30	60
	Cao (có thể xảy ra)	4	4	8	20	40	80
	Rất cao (rất có thể xảy ra)	5	5	10	25	50	100

**Bảng 9.5.** Phân loại các rủi ro theo điểm rủi ro.

Điểm rủi ro	Mức độ rủi ro	Màu sắc
$41 \leq SR \leq 100$	5 – Rủi ro rất cao	Đỏ
$21 \leq SR \leq 40$	4 – Rủi ro cao	Cam
$10 \leq SR \leq 20$	3 – Rủi ro trung bình	Vàng
$5 \leq SR \leq 9$	2 – Nguy cơ thấp	Xanh lá nhạt
$1 \leq SR \leq 4$	1 – Rủi ro rất thấp	Xanh lá đậm

9.1.5. Xếp hạng rủi ro và phân tích kết quả

Từ Bảng 9.4 cho điểm rủi ro, các yếu tố rủi ro được phân loại chi tiết và thể hiện kết quả trong Bảng 9.6.



**Bảng 9.6.** Mức độ rủi ro cho từng yếu tố rủi ro.

<b>Ri</b>	<b>Điểm xác suất</b>	<b>Điểm tác động</b>	<b>Điểm rủi ro</b>	<b>Mức độ rủi ro</b>
R1	1	20	20	3
R2	1	20	20	3
R3	1	20	20	3
R4	1	20	20	3
R5	3	10	30	4
R6	3	10	30	4
R7	2	20	40	4
R8	3	5	15	3

## 10. Báo cáo về tài chính và kinh tế

## 11. Kết luận

Trong nội dung đồ án đã giải quyết những nội dung sau

- Xây dựng mô hình robot công nghiệp.
- Tính toán động học thuận và động học ngược robot.
- Thiết kế quỹ đạo chuyển động.
- Tính toán động lực học.
- Xây dựng bộ điều khiển bằng Matlab-Simulink

## 12. Tiêu chuẩn

- TCVN 13229-1:2020, Rô bốt và các bộ phận cấu thành rô bốt – Yêu cầu an toàn cho rô bốt công nghiệp – Phần 1: Rô bốt
- TCVN 13229-2:2020, Rô bốt và các bộ phận cấu thành rô bốt – Yêu cầu an toàn cho rô bốt công nghiệp – Phần 2: Hệ thống rô bốt và sự tích hợp
- TCVN 7383, An toàn máy – Nguyên tắc chung cho thiết kế
- ISO 9283:1998, Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods (Rô bốt tay máy công nghiệp - Các tiêu chí đặc tính và các phương pháp thử có liên quan).
- IEC 62061:2005, Safety of machinery - Functional safety of safety related electrical, electronic and programmable electronic control systems (An toàn máy - An toàn chức năng của các hệ thống điều khiển điện, điện tử và điện tử khả lập trình có liên quan đến an toàn).

## 13. Tài liệu tham khảo

- [1] Nguyen Van Khang, 2006 “Động lực học hệ nhiều vật”, NXB Khoa học và Kỹ thuật
- [2] Nguyễn Phùng Quang, 2004 “Matlab & Simulink cho kỹ sư điều khiển tự động”, NXB Khoa học và Kỹ thuật
- [3] Nguyễn Thiện Phúc, 2002 “Robot công nghiệp”, NXB Khoa học và Kỹ thuật

[4] Đào Văn Hiệp, 2006 “Kỹ thuật robot”, NXB Khoa học và Kỹ thuật

[5] Nguyễn Quang Hoàng, 2021 “Cơ sở Robotics – Cơ học và Điều khiển”, NXB Bách Khoa Hà Nội

