

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HCM
KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ
BỘ MÔN TỰ ĐỘNG – ĐIỀU KHIỂN



HCMUTE

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

**THIẾT KẾ MÔ HÌNH VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN TỪ XA
CHO ROBOT CÁP NỐI TIẾP 6 BẬC TỰ ĐỘNG**

Ngành: Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

GVHD: TS. Trần Đức Thiện

SVTH: Lý Phi Cường 19151206

Nguyễn Tiến Đạt 19151113

Trần Minh Khiêm 19151243

Thành phố Hồ Chí Minh, tháng 07 năm 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HCM
KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ
BỘ MÔN TỰ ĐỘNG – ĐIỀU KHIỂN



HCMUTE

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

**THIẾT KẾ MÔ HÌNH VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN TỪ XA
CHO ROBOT CÁP NỐI TIẾP 6 BẬC TỰ ĐỘNG**

Ngành: Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

GVHD: TS. Trần Đức Thiện

SVTH: Lý Phi Cường 19151206

Nguyễn Tiến Đạt 19151113

Trần Minh Khiêm 19151243

Thành phố Hồ Chí Minh, tháng 07 năm 2023

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Giảng viên hướng dẫn: TS. Trần Đức Thiện

Sinh viên thực hiện: Lý Phi Cường	MSSV: 19151206
	Lớp: 191512A
	ĐT: 0941275937
Nguyễn Tiến Đạt	MSSV: 19151113
	Lớp: 19151CL3A
	ĐT: 0967743441
Trần Minh Khiêm	MSSV: 19151243
	Lớp: 191513A
	ĐT: 0378526654

Chuyên ngành: Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Hệ đào tạo: Chính quy

Khoá: 2019 Lớp: 19151

1. Tên đề tài

Thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do.

2. Nội dung của đồ án

- Tìm hiểu tổng quan và cơ sở lý thuyết của đề tài
- Thiết kế mô hình robot cáp 6 bậc tự do trên phần mềm SolidWorks 2021
- Tính toán động học thuận (đặt trực, vẽ không gian làm việc), tính toán động học nghịch của robot cáp 6 bậc tự do theo phương pháp đại số, nêu nhận xét
- Nghiên cứu, xây dựng phương pháp Jacobian để giải động học nghịch cho robot cáp 6 bậc tự do
- Tính toán động học thuận và động học nghịch của robot điều khiển (delta robot)
- Nghiên cứu, xây dựng phương pháp điều khiển qua mạng CAN bus, điều khiển AC Servo và thiết kế giao diện điều khiển
- Nghiên cứu, xây dựng giải thuật ánh xạ không gian làm việc của robot điều khiển (delta robot) để điều khiển robot cáp 6 bậc tự do
- Nghiên cứu, xây dựng hệ thống truyền thông không dây từ xa
- Thi công mô hình robot cáp 6 bậc tự do, thi công tủ điện điều khiển
- Xây dựng chương trình điều khiển từ xa cho robot cáp
- Đánh giá mô hình, đánh giá mạng CAN bus, đánh giá mạng truyền thông không dây từ xa trên mô hình thực tế

3. Các sản phẩm dự kiến

- Mô hình thực nghiệm robot cáp 6 bậc tự do
 - Tủ điện và mạch điều khiển
 - Chương trình điều khiển
 - Quyển báo cáo đồ án tốt nghiệp
 - Poster tóm tắt đề tài
 - Video giới thiệu đề tài

4. Ngành giao đồ án: 10/02/2023

5. Ngày nộp đồ án: 04/07/2023

6. Ngôn ngữ trình bày: Bản báo cáo: Tiếng Anh Tiếng Việt
Trình bày bảo vệ: Tiếng Anh Tiếng Việt

TRƯỜNG KHOA

(Ký và ghi rõ họ tên)

TRƯỞNG NGÀNH

(Ký và ghi rõ họ tên)

GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN

(Ký và ghi rõ họ tên)

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

LỊCH TRÌNH THỰC HIỆN ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ và tên sinh viên 1: Lý Phi Cường MSSV: 19151206
Họ và tên sinh viên 2: Nguyễn Tiên Đạt MSSV: 19151113
Họ và tên sinh viên 3: Trần Minh Khiêm MSSV: 19151243
Tên đề tài: Thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do.

Ngày bắt đầu (tuần)	Nội dung	Xác nhận GVHD
10/02/2023 (1 tuần)	1. Tìm hiểu tổng quan về đề tài và các tài liệu liên quan 1.1. Tìm hiểu các loại robot cáp nối tiếp khác nhau 1.2. Tìm hiểu về mạng CAN 6 nodes 1.3. Tìm hiểu về hệ thống điều khiển từ xa	
17/02/2023 (4 tuần)	2. Thiết kế robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do trên SolidWorks	
03/03/2023 (2 tuần)	3. Tính toán cơ sở lý thuyết: 3.1. Tính toán động học thuận 3.2. Tính toán động học nghịch bằng phương pháp Jacobian	
17/03/2023 (8 tuần)	4. Thi công mô hình 4.1 Chuẩn bị vật tư và lắp ráp mô hình 4.2. Thiết kế và thi công tủ điện điều khiển 4.3. Điều khiển vòng hở và đánh giá	
28/04/2023 (2 tuần)	5. Thiết kế bộ điều khiển phản hồi lực: 5.1. Đọc tín hiệu từ haptic controller và truyền đi trên mạng CAN 5.2. Thiết kế nguyên lý phản hồi xúc giác	
12/05/2023 (2 tuần)	6. Viết báo cáo	
26/05/2023 (2 tuần)	7. Hoàn tất đồ án	

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023
Giảng viên hướng dẫn
(Ký và ghi rõ họ tên)

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

PHIẾU NHẬN XÉT CỦA GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN

Giảng viên hướng dẫn: TS. Trần Đức Thiện

Sinh viên thực hiện:

- | | | |
|--------------------|----------------|----------------|
| 1. Lý Phi Cường | MSSV: 19151206 | Lớp: 191512A |
| 2. Nguyễn Tiến Đạt | MSSV: 19151113 | Lớp: 19151CL3A |
| 3. Trần Minh Khiêm | MSSV: 19151243 | Lớp: 191513A |

Ngành đào tạo: Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Tên đề tài: Thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do.

Ý KIẾN NHẬN XÉT

1. Về nội dung đề tài và khối lượng thực hiện

.....
.....
.....

2. Ưu điểm

.....
.....
.....

3. Nhược điểm

.....
.....
.....

4. Đề nghị cho bảo vệ: Có, Không

5. Đánh giá loại:

6. Điểm: Bằng chữ:

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

Giảng viên hướng dẫn

(Ký và ghi rõ họ tên)

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

PHIẾU NHẬN XÉT PHẢN BIỆN ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

Giảng viên hướng dẫn: TS. Trần Đức Thiện

Sinh viên thực hiện:

- | | | |
|--------------------|----------------|----------------|
| 1. Lý Phi Cường | MSSV: 19151206 | Lớp: 191512A |
| 2. Nguyễn Tiến Đạt | MSSV: 19151113 | Lớp: 19151CL3A |
| 3. Trần Minh Khiêm | MSSV: 19151243 | Lớp: 191513A |

Ngành đào tạo: Công nghệ Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Tên đề tài: Thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do.

Giáo viên phản biện:

Hội đồng:

Ý KIẾN NHẬN XÉT

1. Nhận xét chung về đề tài

.....
.....
.....
.....

2. Ý kiến kết luận (ghi rõ nội dung cần bổ sung, hiệu chỉnh)

.....
.....
.....
.....

Đề nghị: Được bảo vệ, Bổ sung để được bảo vệ, Không được bảo vệ

3. Điểm: Bằng chữ:

4. Câu hỏi phản biện (Giảng viên không cho SV biết trước)

.....
.....
.....
.....

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

Người nhận xét
(Ký và ghi rõ họ tên)

5. Đánh giá đề tài theo rubic sau

Tiêu chí 1: Mức độ thời sự của đề tài, độ khó của đề tài (10%)					Điểm
2	4	6	8	10	
Quá dễ thực hiện	Thực hiện được nhưng thực tế không cần	Vấn đề vừa súc/Cần phải dành thời gian nghiên cứu	Vấn đề khó/Cần nhiều kiến thức tổng hợp đã học	Vấn đề rất khó/Cần nhiều kiến thức tổng hợp đã học	
Tiêu chí 2: Tính ứng dụng của đề tài vào thực tiễn (10%)					
2	4	6	8	10	
Khó ứng dụng	Thỉnh thoảng có ứng dụng	Có ứng dụng	Thực tế bên ngoài đang cần	Thực tế bên ngoài đang rất cần và cấp thiết	
Tiêu chí 3: Tính đúng đắn của đề tài, phương pháp nghiên cứu hợp lý (10%)					
2	4	6	8	10	
Không hợp lý	Có phương pháp nghiên cứu	Có phương pháp nghiên cứu, định hướng đúng	Phương pháp nghiên cứu rõ ràng, định hướng đúng	Phương pháp nghiên cứu rõ ràng, khoa học, phù hợp với đề tài	
Tiêu chí 4: Giải pháp & công nghệ, thi công/mô phỏng (15%)					
3	6	9	12	15	
Giải pháp không rõ ràng	Giải pháp sơ sài	Giải pháp rõ ràng, có thi công mô hình/mô phỏng	Giải pháp rõ ràng, có quy trình thực hiện thi công/mô phỏng vận hành được	Giải pháp rõ ràng, có quy trình thực hiện thi công/mô phỏng vận hành được, kết quả mô phỏng/vận hành tốt	
Tiêu chí 5: Trình bày nội dung đồ án (15%)					
3	6	9	12	15	
Nội dung không rõ ràng	Báo cáo sơ sài	Có đủ cấu trúc, nội dung	Có đầy đủ cấu trúc nội dung, trình bày hợp lý, khoa học	Có đầy đủ cấu trúc nội dung, trình bày hợp lý, khoa học, logic, rõ ràng, dễ hiểu, đúng quy định về trình bày luận văn	
Tiêu chí 6: Khả năng trình bày (10%)					
2	4	6	8	10	
Kém	Trung bình	Khá	Tốt	Rất tốt – Rõ ràng – Tự tin	
Tiêu chí 7: Trả lời các câu hỏi của hội đồng bảo vệ (30%)					
6	12	18	24	30	
Trả lời được < 20% số câu hỏi	Trả lời được < 40% số câu hỏi	Trả lời được < 60% số câu hỏi	Trả lời được < 80% số câu hỏi	Trả lời được 100% số câu hỏi	
Tổng điểm theo thang 10					

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày... tháng... năm 2023

Người nhận xét

(Ký và ghi rõ họ tên)

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

LỜI CAM ĐOAN

Nhóm xin cam kết rằng đồ án tốt nghiệp với đề tài “Thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do” là do nhóm tự nghiên cứu và thực hiện độc lập. Nhóm có dựa vào một số tài liệu trước đó nhưng không sao chép. Các số liệu được cung cấp từ báo cáo đều là kết quả nghiên cứu hoàn toàn trung thực. Những tài liệu trích dẫn đều đã được ghi lại rõ nguồn gốc.

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày...tháng...năm 2023

Nhóm thực hiện đề tài
(Ký và ghi rõ họ tên)

Lý Phi Cường – Nguyễn Tiên Đạt – Trần Minh Khiêm

LỜI CẢM ƠN

Trong thời đại công nghệ 4.0 với sự phát triển vượt bậc của nền khoa học và công nghệ thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng. Việc nghiên cứu khoa học kỹ thuật đóng một vai trò quan trọng trong việc sáng tạo ra những phương pháp nâng cao giúp phát hiện và giải quyết vấn đề một cách tốt nhất. Vì vậy, việc áp dụng khoa học kỹ thuật chính là việc tạo ra công nghệ mới với nhiều đặc điểm tối ưu làm nâng cao năng suất lao động, làm việc một cách có hiệu quả nhất và bảo đảm an toàn cho người lao động trong quá trình làm việc. Để tạo nền tảng cho bước phát triển trong tương lai, chúng ta cần kế thừa và phát huy hiệu quả những thành tựu của thế hệ trước, mạnh dạn nhìn nhận vấn đề, đề tài chưa có ai thực hiện nghiên cứu hay những đề tài mang tính mới mẻ.

Với điều kiện thời gian cũng như kinh nghiệm còn hạn chế, việc tiếp cận vào nghiên cứu khoa học, nghiên cứu đề tài thực tế, chúng em gặp không ít khó khăn bởi vốn kiến thức, kỹ năng. Chính vì thế không thể tránh được những thiếu sót. Để đồ án tốt nghiệp này đạt kết quả tốt đẹp, chúng em đã nhận được sự hỗ trợ, giúp đỡ của các Thầy/Cô của trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Thành phố Hồ Chí Minh, đặc biệt là Thầy TS. Trần Đức Thiện đã nhiệt tình hướng dẫn chúng em hoàn thành tốt Khóa luận tốt nghiệp. Với tình cảm sâu sắc, chân thành, cho phép chúng em được bày tỏ lòng biết ơn đến tất cả các quý Thầy/Cô đã tạo điều kiện giúp đỡ trong quá trình học tập và nghiên cứu đề tài.

Sau cùng, em xin kính chúc quý Thầy/Cô thật dồi dào sức khỏe, niềm tin để tiếp tục thực hiện sứ mệnh cao đẹp của mình là truyền đạt kiến thức cho thế hệ mai sau.

Chúng em xin chân thành cảm ơn!

Nhóm thực hiện đề tài xin chân thành cảm ơn!

Nhóm thực hiện đề tài

(Ký và ghi rõ họ tên)

Lý Phi Cường – Nguyễn Tiến Đạt – Trần Minh Khiêm

TÓM TẮT ĐỒ ÁN

Hiện nay, lĩnh vực khoa học kỹ thuật đang phát triển mạnh mẽ và mang đến những sự thay đổi đáng kể trong quá trình sản xuất. Điều này dẫn đến sự thay đổi lớn trong lực lượng lao động trong tất cả các ngành nghề, khi máy móc thay thế công việc của con người nhằm nâng cao năng suất lao động, tăng sản lượng và chất lượng sản phẩm. Do đó, việc áp dụng robot công nghiệp hay còn được gọi là các tay máy trong quy trình sản xuất đang được rất ưa chuộng, bởi chúng đáp ứng được các yêu cầu trên một cách hiệu quả.

Mục đích của luận văn này hướng đến việc nghiên cứu, chế tạo mô hình robot cáp 6 bậc tự do, truyền động bằng cáp, điều khiển phân tán và động bộ bằng mạng CAN và có khả năng được điều khiển từ xa bởi một thiết bị thiết bị robot khác, đóng vai trò như một 3D joystick. Nghiên cứu và áp dụng phương pháp giải động học nghịch cho robot. Việc nghiên cứu robot cáp 6 bậc tự do giúp tăng khả năng hoạt động linh hoạt, khéo léo và chính xác cho robot công nghiệp. Mạng CAN bus cho phép trao đổi thông tin nhanh chóng và đáng tin cậy giữa các thiết bị master và slave trong hệ thống, cho phép áp dụng hệ thống điều khiển phân tán vào hệ thống robot cáp. Bên cạnh đó, việc nghiên cứu và xây dựng hệ thống điều khiển từ xa cho robot giúp tăng khả năng tiếp cận đến các hệ thống áp dụng điều khiển và vận hành robot từ xa, đặc biệt là trong các môi trường nguy hiểm, khắc nghiệt. Nhóm thực hiện luận văn hy vọng sẽ đóng góp một phần công sức, kiến thức vào việc nghiên cứu, tiếp cận robot đa bậc ở các trường đại học.

Trong đồ án, nhóm đã thực hiện nội dung sau: Tìm hiểu tổng quan về robot cáp; Tìm hiểu về các hệ thống điều khiển robot từ xa; Nghiên cứu và thiết kế mô hình robot cáp 6 bậc tự do, thiết kế tủ điện, mạch điều khiển; Tính toán động học áp dụng giải thuật Jacobian cho mô hình robot cáp 6 bậc tự do; Mô phỏng, kiểm nghiệm thuật toán trên phần mềm Matlab Simulink và Simscape Multibody; Nghiên cứu, xây dựng mạng CAN bus, điều khiển AC Servo; Nghiên cứu và xây dựng phương pháp ánh xạ không gian làm việc, xây dựng hệ thống điều khiển từ xa cho robot cáp; Thi công và lắp ráp mô hình thực nghiệm, thi công tủ điện điều khiển. Xây dựng chương trình điều khiển chuyển động và chương trình điều khiển từ xa cho mô hình robot; Kiểm chứng, đánh giá mô hình với giải thuật, đánh giá mạng CAN, đánh giá hệ thống điều khiển từ xa trên thực nghiệm.

Nội dung đồ án bao gồm 7 chương (Chương 1 – Tổng quan, Chương 2 – Cơ sở lý thuyết, Chương 3 – Thiết kế và thi công hệ thống, Chương 4 – Tính toán động học hệ thống, Chương 5 – Mô phỏng hệ thống, Chương 6 – Thực nghiệm và đánh giá hệ thống, Chương 7 – Kết luận và hướng phát triển).

MỤC LỤC

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	i
LỊCH TRÌNH THỰC HIỆN ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP.....	iii
PHIẾU NHẬN XÉT KHOÁ LUẬN TỐT NGHIỆP.....	iv
PHIẾU NHẬN XÉT PHẢN BIỆN KHOÁ LUẬN TỐT NGHIỆP	v
LỜI CAM ĐOAN	vii
LỜI CẢM ƠN	viii
TÓM TẮT ĐỒ ÁN.....	ix
MỤC LỤC	x
DANH MỤC HÌNH ẢNH	xiii
DANH MỤC BẢNG BIỂU	xix
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT.....	xx
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN.....	1
1.1 Đặt vấn đề	1
1.1.1 Tình hình nghiên cứu ngoài nước.....	2
1.1.2 Tình hình nghiên cứu trong nước	5
1.2 Mục đích và mục tiêu của đề tài	7
1.2.1 Mục đích của đề tài.....	7
1.2.2 Mục tiêu của đề tài	7
1.3 Phương pháp nghiên cứu.....	7
1.4 Giới hạn đề tài	7
1.5 Giới thiệu nội dung.....	7
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....	9
2.1 Tổng quan robot	9
2.2 Động học robot	9
2.2.1 Động học thuận.....	9
2.2.2 Động học nghịch.....	10
2.3 Lý thuyết về phương pháp Jacobian	11
2.3.1 Các thành phần vận tốc từ khớp tới khớp trong cánh tay robot	11
2.3.2 Ma trận Jacobian.....	11
2.3.3 Phương pháp Jacobian transpose.....	12

2.3.4 Phương pháp pseudoinverse.....	12
2.4 Quy hoạch quỹ đạo.....	13
2.5 Lý thuyết về mạng CAN bus	14
2.5.1 Tổng quan về mạng CAN bus	14
2.5.2 Các loại khung truyền.....	15
2.6 Lý thuyết về hệ thống điều khiển robot từ xa.....	16
2.7 Lý thuyết về phương pháp phản hồi lực	17
2.8 Lý thuyết về hệ thống điều khiển phân tán	18
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG	20
3.1 Tổng quan về hệ thống thi công.....	20
3.2 Thiết kế và thi công mô hình robot	21
3.2.1 Thiết kế mô hình robot	21
3.2.2 Thi công mô hình robot	28
3.3 Thiết kế và thi công module CAN.....	30
3.3.1 Yêu cầu thiết kế cho module CAN.....	30
3.3.2 Sơ đồ khối cho module CAN	31
3.3.3 Sơ đồ nguyên lý cho module CAN.....	31
3.3.4 Thi công module CAN	35
3.4 Thiết kế và thi công mạng CAN cho robot cáp 6 bậc tự do	35
3.4.1 Thiết kế mạng CAN cho robot cáp 6 bậc tự do.....	35
3.4.2 Thi công mạng CAN cho robot cáp 6 bậc tự do.....	40
3.5 Thiết kế và thi công tủ điện	40
3.5.1 Danh sách thiết bị của tủ điện	40
3.5.2 Sơ đồ nối dây hệ thống	42
3.6 Xây dựng giao diện quan sát và thu thập dữ liệu	47
CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG	52
4.1 Động học joystick	52
4.1.1 Động học nghịch joystick	52
4.1.2 Động học thuận joystick	55
4.2 Động học robot cáp 6 bậc tự do	58
4.2.1 Đặt trực robot cáp 6 bậc tự do	58

4.2.2 Động học thuận robot cáp 6 bậc tự do.....	59
4.2.3 Giải động học nghịch robot cáp bằng phương pháp đại số	61
4.2.4 Giải động học nghịch robot cáp bằng phương pháp Jacobian	65
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG	66
5.1 Tổng quan về hệ thống mô phỏng.....	66
5.2 Kiểm chứng động học nghịch sử dụng phương pháp Jacobian.....	66
5.3 Mô phỏng quy hoạch quỹ đạo cho robot cáp.....	68
5.3.1 Mô phỏng quy hoạch quỹ đạo hình tam giác	68
5.3.2 Mô phỏng quy hoạch quỹ đạo hình tròn.....	70
5.4 Các bước xây dựng hệ thống điều khiển từ xa	71
5.4.1 Áp dụng phương pháp phản hồi lực vào hệ thống điều khiển từ xa	73
5.4.2 Khảo sát các thông số của hệ thống phản hồi lực	75
5.5 Mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực	78
5.6 Mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực.....	82
CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG.....	87
6.1 Thực nghiệm mạng truyền thông CAN.....	87
6.2 Quy hoạch quỹ đạo cho robot trong thực tế	90
6.2.1 Quy hoạch quỹ đạo hình tam giác	90
6.2.2 Quy hoạch quỹ đạo hình tròn	94
6.3 Thực nghiệm điều khiển từ xa cho robot không có phản hồi lực	98
6.4 Thực nghiệm điều khiển từ xa cho robot có phản hồi lực.....	101
6.4.1 Dữ liệu được thu thập trên master	102
6.4.2 Dữ liệu được thu thập trên slave	104
CHƯƠNG 7: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN.....	109
7.1 Kết luận	109
7.2 Hướng phát triển.....	109
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	110

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Ứng dụng của robot; a) trong gấp thả hàng hóa; b) trong hàn cắt máy móc; c) trong chăm sóc cây nông nghiệp; d) trong ghi mã sản phẩm	1
Hình 1.2: Ứng dụng của robot cáp; a) trong thăm dò; b) trong hàn cắt	2
Hình 1.3: Ứng dụng của robot điều khiển từ xa; a) trong cắt bề mặt kim loại; b) trong khám chữa bệnh từ xa; c) trong phẫu thuật từ xa	4
Hình 1.4: Số lượng nhập khẩu robot ở Việt Nam giai đoạn 2016 – 2021 theo Statista ..	5
Hình 2.1: Thông số trong hệ trục giữa và Z_i (một cặp khâu khớp)	10
Hình 2.2: Hình ảnh minh họa các thành phần của cánh tay máy	11
Hình 2.3: Mô hình tổng quan về cấu trúc mạng CAN	14
Hình 2.4: Sơ đồ mô tả phương pháp ánh xạ	16
Hình 2.5: Tạo ra đối tượng ảo để điều khiển lực tạo ra bởi thiết bị phản hồi lực	17
Hình 2.6: Kiến trúc điều khiển tập trung	18
Hình 2.7: Kiến trúc điều khiển phân tán	19
Hình 3.1: Tổng quan về hệ thống điều khiển từ xa robot cáp	20
Hình 3.2: Tổng quan mô hình 3D robot 6 bậc tự do	21
Hình 3.3: Cấu trúc tổng quan mô hình 3D robot	21
Hình 3.4: Mô hình đế robot	22
Hình 3.5: Mô hình 3D hai tấm nhôm ở đế robot a) tấm nhôm thứ 1; b) tấm nhôm thứ 2	22
Hình 3.6: Mô hình 3D cơ cấu cảng cáp	23
Hình 3.7: Mô hình 3D bộ động cơ ở đế robot a) bộ động cơ 400W và hộp số; b) nẹp bộ động cơ 400W; c) bộ động cơ 100W và hộp số; d) nẹp bộ động cơ 100W	23
Hình 3.8: Mô hình 3D pulley động cơ ở đế robot a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn từ trên xuống	24
Hình 3.9: Thứ tự động cơ trên mô hình 3D	24
Hình 3.10: Cấu trúc mô hình 3D thân robot	25
Hình 3.11: Mô hình 3D khâu 1 a) mô hình lắp ghép; b) chi tiết 1; c) chi tiết 2; d) chi tiết 3	25
Hình 3.12: Mô hình 3D của khâu 2 và khâu 3	26
Hình 3.13: Mô hình 3D khâu cuối của robot a) mô hình lắp ghép; b) chi tiết 2; c) chi tiết 3	26
Hình 3.14: Mô hình 3D của khớp robot	27
Hình 3.15: Mô hình 3D tay nối dài a) giữ pulley xoay quanh trục Y; b) giữ pulley xoay quanh trục Z; c) giữ encoder cho khớp xoay quanh trục Y; d) giữ encoder cho khớp xoay quanh trục Z	27
Hình 3.16: Mô hình 3D khớp vạn năng của robot a) mô hình lắp ghép; b) chi tiết 1; c) chi tiết 2; d) chi tiết 3, 4, 5, và 6	28

Hình 3.17: Mô hình 3D pulley trên thân robot a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn từ trên xuống	28
Hình 3.18: Tổng quan mô hình robot thi công	29
Hình 3.19: Thi công đế robot	29
Hình 3.20: Thi công khâu của robot	29
Hình 3.21: Thi công khớp của robot	30
Hình 3.22: Thi công thân robot	30
Hình 3.23: Sơ đồ khói các thành phần trong module CAN	31
Hình 3.24: Khối nguồn 5VDC trong một node CAN	31
Hình 3.25: Khối nguồn 3.3VDC trong một node CAN	32
Hình 3.26: Cổng nạp chương trình trên một node CAN	32
Hình 3.27: Bộ lọc thông thấp đọc encoder từ AC Servo trong một node CAN	32
Hình 3.28: Mạch đọc encoder gắn trên link trong một node CAN	33
Hình 3.29: Module giao tiếp CAN TJA trong một node CAN	33
Hình 3.30: Mạch tạo dao động cho vi xử lý	33
Hình 3.31: Nút nhấn reset	34
Hình 3.32: Sơ đồ chân sử dụng trên MCU STM32F103C8T6	34
Hình 3.33: Mô hình 3D của một node CAN	34
Hình 3.34: Thi công module CAN	35
Hình 3.35: Sơ đồ tổng quan hệ thống mạng CAN	35
Hình 3.36: Cấu trúc tin nhắn từ microcomputer cho master	36
Hình 3.37: Lưu đồ giải thuật trên vi điều khiển master module a) chương trình chính; b) chương trình ngắt timer	36
Hình 3.38: Lưu đồ chương trình ngắt nhận CAN trên vi điều khiển master	37
Hình 3.39: Lưu đồ giải thuật trên vi điều khiển slave module a) chương trình chính; b) chương trình con “Tính toán xung cho driver” và “Tính toán và gửi dữ liệu”; c) chương trình timer định thời	38
Hình 3.40: Tin nhắn master và slave trao đổi với nhau	39
Hình 3.41: Hình ảnh mô tả bộ lọc tin nhắn	39
Hình 3.42: Thi công mạng CAN 6 node	40
Hình 3.43: Sơ đồ đi dây tổng quát các khói của hệ thống ở Slave	42
Hình 3.44: Sơ đồ nối dây tủ điện	43
Hình 3.45: Sơ đồ đi dây mạch động lực	44
Hình 3.46: Sơ đồ đi dây mạch điều khiển	45
Hình 3.47: Sơ đồ nối dây Master	45
Hình 3.48: Sơ đồ nối dây 1 Node của Slave	46
Hình 3.49: Sơ đồ nối dây khói CAN module	46
Hình 3.50: Kết quả đi dây tủ điện điều khiển	46
Hình 3.51: Hệ thống sau khi đi dây hoàn thiện	47
Hình 3.52: Phần mềm QT Creator	48

Hình 3.53: Tab_intro	48
Hình 3.54: Tab_setup	49
Hình 3.55: Tab_trajectory	49
Hình 3.56: Tab_error_Pos	50
Hình 3.57: Tab_angle	50
Hình 3.58: Tab_error_angle	51
Hình 4.1: a) Hệ trục tọa độ của thiết bị haptic; b) động học 1 cánh tay của thiết bị haptic; c) góc nhìn hệ trục từ đế robot.....	52
Hình 4.2: Cấu trúc của robot song song 3 bậc tự do	55
Hình 4.3: Hình ảnh mô tả phương pháp 3 mặt cầu.....	56
Hình 4.4: Hệ trục tọa độ của robot	58
Hình 4.5: a) Góc nhìn theo hệ tọa độ XOZ; b) góc nhìn theo hệ tọa độ XOY	59
Hình 5.1: Sơ đồ khối mô phỏng hệ thống.....	66
Hình 5.2: a) Minh họa kiểm chứng Jacobian với 2 điểm; b) Vị trí robot sau khi thực hiện thành công phương pháp Jacobian	66
Hình 5.3: Lưu đồ kiểm chứng phương pháp Jacobian	67
Hình 5.4: Sơ đồ mô phỏng phương pháp Jacobian với quỹ đạo quy hoạch.....	68
Hình 5.5: Quy hoạch quỹ đạo hình tam giác bằng phương pháp Jacobian a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ.....	68
Hình 5.6: Đáp ứng của robot với quỹ đạo hình tam giác a) trục x; b) trục y; c) trục z ..	69
Hình 5.7: Sai số vị trí của robot theo với quỹ đạo hình tam giác; a) trục x; b) trục y; c) trục z ..	69
Hình 5.8: Quy hoạch quỹ đạo hình tròn bằng phương pháp Jacobian a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ	70
Hình 5.9: Đáp ứng vị trí của robot với quỹ đạo hình tròn a) trục x; b) trục y; c) trục z ..	70
Hình 5.10: Sai số vị trí của robot với quỹ đạo hình tròn a) trục x; b) trục y; c) trục z ..	71
Hình 5.11: Không gian làm việc của thiết bị joystick	71
Hình 5.12: Không gian làm việc của robot cáp 6 bậc tự do	72
Hình 5.13: Vùng không gian làm việc chung giữa a) robot cáp 6 bậc tự do b) joystick	72
Hình 5.14: Tổng quan về phương pháp áp dụng cho phản hồi lực	73
Hình 5.15: Lưu đồ hoạt động của Master trong hệ thống điều khiển từ xa kết hợp phản hồi lực	74
Hình 5.16: Diễn biến lực phản hồi khi robot ở vùng điểm nằm ngoài không gian làm việc.....	74
Hình 5.17: Khảo sát các thông số lực phản hồi với $k_s = 0.2$ và $c = 3$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick.....	76
Hình 5.18: Khảo sát các thông số lực phản hồi với $k_s = 0.5$ và $c = 3$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick.....	76

Hình 5.19: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 1$ và $c = 3$ a) đáp ứng vị trí trực z joystick; b) sai số vị trí trực z joystick.....	77
Hình 5.20: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 0.2$ và $c = 1$ a) đáp ứng vị trí trực z joystick; b) sai số vị trí trực z joystick.....	77
Hình 5.21: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 0.2$ và $c = 5$ a) đáp ứng vị trí trực z joystick; b) sai số vị trí trực z joystick.....	77
Hình 5.22: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 0.2$ và $c = 9$ a) đáp ứng vị trí trực z joystick; b) sai số vị trí trực z joystick.....	78
Hình 5.23: Mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực	78
Hình 5.24: Quỹ đạo chuyển động của robot khi mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 1 a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ.....	79
Hình 5.25 Tín hiệu vị trí theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 1	79
Hình 5.26: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 1	80
Hình 5.27: Quỹ đạo chuyển động của robot khi mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 2; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ.....	80
Hình 5.28 Tín hiệu vị trí theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 2	81
Hình 5.29 Tín hiệu sai số vị trí theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 2	81
Hình 5.30: Sơ đồ khối mô phỏng phản hồi lực	82
Hình 5.31: Không gian làm việc của hai robot; a) của robot cáp và joystick trước khi ánh xạ; b) của joystick sau khi ánh xạ.....	82
Hình 5.32: Không gian làm việc chung của 2 robot sau phép ánh xạ	82
Hình 5.33: Tín hiệu vị trí đặt của robot theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực	83
Hình 5.34: Toạ độ vị trí robot di chuyển ra bên ngoài vùng làm việc; a) trực x; b) trực y; c) trực z	84
Hình 5.35: Vị trí điểm nằm ngoài vùng không gian làm việc của robot khi chạy trên mô phỏng	84
Hình 5.36 Tín hiệu sai số vị trí theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực.....	85
Hình 5.37 Tín hiệu lực tác động theo a) trực x, b) trực y và c) trực z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực.....	85
Hình 6.1: Sơ đồ tổng quan thực nghiệm kiểm chứng mạng CAN	87
Hình 6.2: Kết quả kiểm chứng mạng CAN thí nghiệm 1	87
Hình 6.3: Số xung nhận được trên driver thí nghiệm 1	88
Hình 6.4: Kết quả kiểm chứng mạng CAN thí nghiệm 2	88

Hình 6.5: Số xung nhận được trên driver thí nghiệm 2.....	89
Hình 6.6: Kết quả kiểm chứng mạng CAN thí nghiệm 2.....	89
Hình 6.7: Số xung nhận được trên driver thí nghiệm 3.....	90
Hình 6.8: a) Quỹ đạo tam giác trong mặt phẳng XYZ; b) quỹ đạo tam giác trong mặt phẳng YOZ	91
Hình 6.9: Vị trí robot khi quy hoạch quỹ đạo tam giác a) vị trí theo trục X; b) vị trí theo trục Y; c) vị trí theo trục Z.....	91
Hình 6.10: Sai số quy hoạch quỹ đạo hình tam giác vị trí của robot a) sai số theo trục X; b) sai số theo trục Y; c) sai số theo trục Z	92
Hình 6.11: Đáp ứng góc quy hoạch quỹ đạo hình tam giác của robot a) góc theta1; b) góc theta2; c) góc theta3; d) góc theta4; e) góc theta5; f) góc theta6.....	92
Hình 6.12: Đáp ứng sai số góc quy hoạch quỹ đạo hình tam giác a) sai số góc theta1; b) sai số góc theta2; c) sai số góc theta3; d) sai số góc theta4; e) sai số góc theta5; f) sai số góc theta6.....	93
Hình 6.13: a) Quỹ đạo hình tròn trong mặt phẳng XYZ; b) quỹ đạo hình tròn trong mặt phẳng YOZ	94
Hình 6.14: Đáp ứng vị trí quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) vị trí theo trục X; b) vị trí theo trục Y; c) vị trí theo trục Z.....	95
Hình 6.15: Đáp ứng sai số quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) sai số theo trục X; b) sai số theo trục Y; c) sai số theo trục Z	95
Hình 6.16: Đáp ứng góc của robot khi quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) góc theta1; b) góc theta2; c) góc theta3; d) góc theta4; e) góc theta5; f) góc theta6	96
Hình 6.17: Đáp ứng sai các khớp khi quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) sai số khớp 1; b) sai số khớp 2; c) sai số khớp 3; d) sai số khớp 4; e) sai số khớp 5; f) sai số khớp 6.....	97
Hình 6.18: Tổng quan thực nghiệm điều khiển từ xa không có phản hồi lực	98
Hình 6.19: Quỹ đạo chuyển động của robot trong trường hợp điều khiển từ xa không có phản hồi lực; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ.....	98
Hình 6.20: Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực.....	99
Hình 6.21: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực.....	99
Hình 6.22: Tín hiệu đáp ứng góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6	100
Hình 6.23: Tín hiệu sai số góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6	101
Hình 6.24: Tổng quan thực nghiệm điều khiển từ xa có phản hồi lực	101
Hình 6.25: Quỹ đạo chuyển động của joystick sau khi ánh xạ, quỹ đạo tín hiệu đặt và quỹ đạo chuyển động của robot; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ	102

Hình 6.26: Quỹ đạo chuyển động của robot trong trường hợp điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ	102
Hình 6.27: Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực.....	103
Hình 6.28: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực.....	103
Hình 6.29: Tín hiệu lực tác động theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực.....	104
Hình 6.30: Quỹ đạo chuyển động của robot trong trường hợp điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ	104
Hình 6.31: Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực (slave).....	105
Hình 6.32: a) Đáp ứng vị trí theo trục x chưa có phản hồi lực (master); b) đáp ứng vị trí theo trục x khi có phản hồi lực (slave)	105
Hình 6.33: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực (slave).....	106
Hình 6.34: Tín hiệu đáp ứng góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6	107
Hình 6.35 Tín hiệu sai số góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6	108
Hình 6.36: Vị trí điểm nằm ngoài vùng không gian làm việc của robot trong không gian a) Oxyz; b) Oxz khi tiến hành chạy thực nghiệm.....	108

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Phân loại các loại robot truyền động bằng cáp	3
Bảng 1.2: Các đề tài nghiên cứu về robot cáp ở Việt Nam	5
Bảng 2.1: Thông số kỹ thuật CAN 2.0	15
Bảng 3.1: Yêu cầu thiết kế module CAN	30
Bảng 3.2: Một số ký hiệu tên động cơ sử dụng trong tin nhắn	36
Bảng 3.3: Ví dụ đơn giản về bộ lọc tin nhắn	39
Bảng 3.4: Bảng cấu hình Filter ID và Filter Mask	39
Bảng 3.5: Danh sách thiết bị tủ điện	40
Bảng 3.6: Mô tả các trang trong giao diện quan sát và thu thập dữ liệu	48
Bảng 4.1: Ký hiệu viết gọn	57
Bảng 4.2: bảng D-H của robot cáp 6 bậc tự do	59
Bảng 5.1: Kết quả kiểm chứng phương pháp Jacobian với 2 điểm	67
Bảng 5.2: Kết quả kiểm chứng phương pháp Jacobian với nhiều điểm	67
Bảng 5.3: Khảo sát các thông số hệ thống phản hồi lực	75
Bảng 5.4: So sánh kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có và không có phản hồi lực	86
Bảng 6.1: Vị trí góc của động cơ trong thí nghiệm 3	89
Bảng 6.2: Số xung cần phát của động cơ trong thí nghiệm 3	90
Bảng 6.3: Giá trị RMS với quỹ đạo hình tam giác	93
Bảng 6.4: Giá trị RMS với quỹ đạo hình tròn	97

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

STT	Ký hiệu chữ viết tắt	Chữ viết đầy đủ
1	CRAM	Cable-driven Remote Access Manipulator
2	WHIM	Weighted Harmonic Isotropy Measure
3	CDHM	Cable-driven Hyper-Redundant Manipulator
4	CRSM	Cable-Driven Redundant Spatial Manipulator
5	DOF	Degrees of Freedom
6	UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
7	CAN	Controller Area Network
8	CAN FD	Controller Area Network Flexible Data
9	CAN_H	Controller Area Network High
10	CAN_L	Controller Area Network Low
11	ID	Identification
12	RMSE	Root Mean Square Error
13	ISO	International Organization for Standardization
14	AC	Alternating Current
15	DC	Direct Current

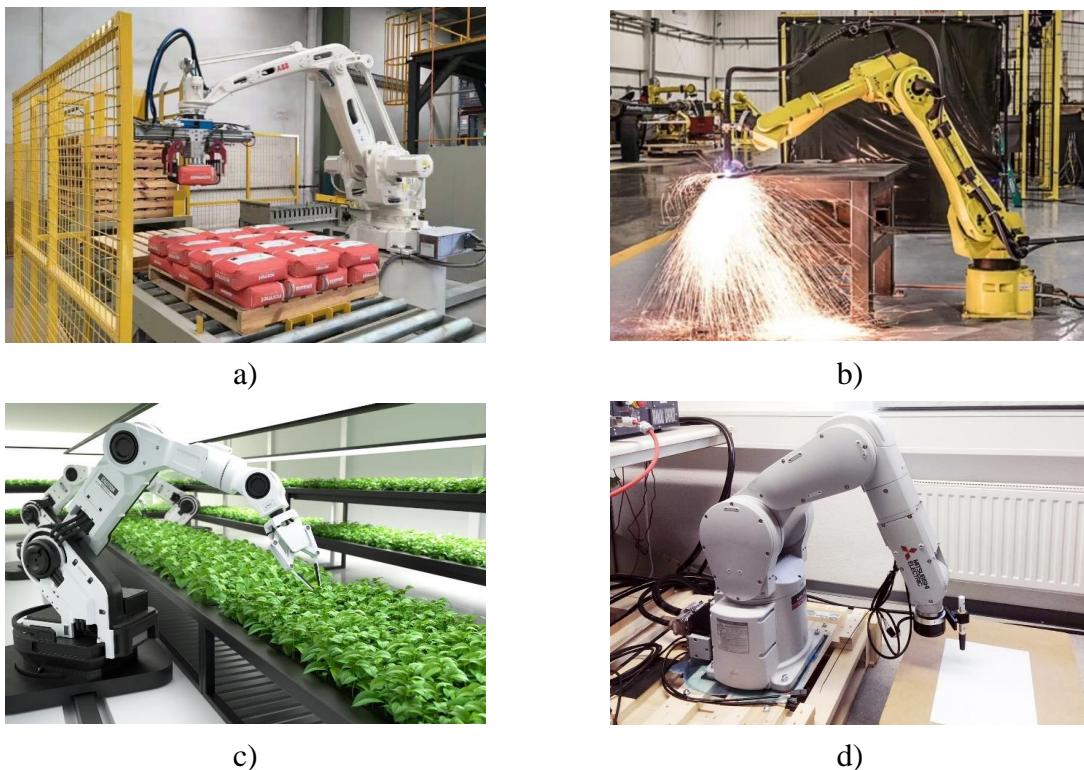
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

Nội dung của chương này trình bày về tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước để thấy được tính thực tiễn và tầm quan trọng của đề tài. Bên cạnh đó còn đề cập đến mục đích và mục tiêu hướng đến của đề tài. Những mặt giới hạn mà nhóm chưa giải quyết liên quan đến đề tài.

1.1 Đặt vấn đề

Ngày nay sự phát triển về công nghệ ngày càng chạm tới những cột mốc đáng kể đặc biệt là trong lĩnh vực robot. Những công việc mang tính chất lặp đi lặp lại, những công việc nguy hiểm đều được robot dần dần thay thế giúp giảm bớt sức lao động cho con người. Robot được ứng dụng một cách rộng rãi từ các nhà máy lớn, đến các lĩnh vực đòi hỏi độ chính xác cao như y tế, thám hiểm, cứu nạn cứu hộ... Lĩnh vực robot ngày càng được các quốc gia quan tâm, nên nó được nghiên cứu và phát triển không ngừng, ngày càng hoàn thiện và tối ưu về phần cứng, cải thiện độ chính xác, nâng cao công suất và tốc độ của robot. Dần dần nó có thể đáp ứng được mọi nhu cầu mà con người đặt ra.

Trước đây ta từng biết đến robot chủ yếu là các cấu trúc kiểu cánh tay như PUMA 560, IRB 6620, RV-2FR... được ứng dụng trong lĩnh vực công nghiệp, đặc điểm chung của chúng là có động cơ được đặt chủ yếu ở từng khớp của robot, robot có cấu trúc thẳng đứng, hoạt động trong những khu vực có không gian rộng rãi và không có vật cản [1].



Hình 1.1: Ứng dụng của robot; a) trong gấp thả hàng hóa; b) trong hàn cắt máy móc; c) trong chăm sóc cây nông nghiệp; d) trong ghi mã sản phẩm

Ngoài ra, trong các môi trường hẹp và khắc nghiệt, cấu trúc robot như trên khó có thể đáp ứng ổn định khi hoạt động. Do đó một số cấu trúc robot mới được ra đời,

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

mobile robot, robot truyền động sử dụng cáp... những loại robot này có tính linh hoạt cao, dễ dàng di chuyển với nhiều địa hình trong các môi trường phức tạp, trong những môi trường có sự hạn chế về không gian làm việc, môi trường nguy hiểm nhiều vật cản, nhưng vẫn đáp ứng độ linh hoạt và chính xác cao. Chính vì thế, những cấu trúc robot đa bậc đã được quan tâm, nghiên cứu và phát triển. Với cấu trúc là đa bậc [2] nên nó cực kỳ linh hoạt trong các môi trường làm việc khác nhau, dùng để kiểm tra và bảo dưỡng những máy móc có không gian làm việc hẹp những môi trường khó tiếp cận và có thể gây nguy hiểm đối với con người. Nó còn được ứng dụng để thăm dò, thám hiểm và cứu nạn cứu hộ, phẫu thuật [3] hay ở những khu vực nguy hiểm mà con người khó có thể chạm đến được.Thêm vào đó là độ dài của robot cũng phải khá lớn vì ta cần phải vào sâu bên trong khu vực cần làm việc và nhờ vào cấu trúc nhiều bậc nên việc tránh né các vật cản trên con đường di chuyển cũng sẽ khá dễ dàng. Một điều nữa là động cơ của robot như này sẽ không được đặt lên thân robot mà ta sẽ tập trung ở phần để robot để phần thân trở nên linh hoạt hơn và giúp hạn chế bởi nhiều từ trường tác động đến phần thân robot vì trên toàn bộ phần thân robot sẽ không có thiết bị điện nào mà chỉ có dây cáp [4].



Hình 1.2: Ứng dụng của robot cáp; a) trong thăm dò; b) trong hàn cắt

1.1.1 Tình hình nghiên cứu ngoài nước

Trên thế giới, robot được điều khiển chuyển động bằng cáp được nghiên cứu khá là nhiều. Robot cáp được chia ra thành nhiều nhóm khác nhau tùy thuộc vào cấu trúc của nó khi kết hợp với dây cáp, có thể được chia thành các nhóm như sau: robot có cấu trúc giống gân hay cơ bắp cơ thể con người (Tendon Robot) mang nhiều hình thái robot khác nhau một số hình dạng đặc trưng như rắn, giun... Với cấu trúc robot này thì được ứng dụng rất phổ biến trong y học để nội soi, ứng dụng khám phá trong các con tàu để sửa chữa những hư hỏng có thể xảy ra, robot có cấu trúc giống quả bóng nhưng bên trong nó là bao gồm các thanh cứng được nối với nhau bằng dây cáp và có gân lò xo (Tensegrity Robot) robot được công ty Nasa chuyên về hàng không vũ trụ của Mỹ nghiên cứu và phát triển ứng dụng trong việc khám phá các bề mặt không gian ở các hành tinh khác nhau và với robot có cấu trúc giống robot song song nhưng cho ra không gian làm việc rộng hơn (Suspended Cable Robot) mang một hình dáng như robot song

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

song thường dùng trong việc quay film, ghi hình ở những sân vận động bóng đá, kết hợp với công nghệ in 3D để in những công trình có kích thước lớn.

Bảng 1.1: Phân loại các loại robot truyền động bằng cáp

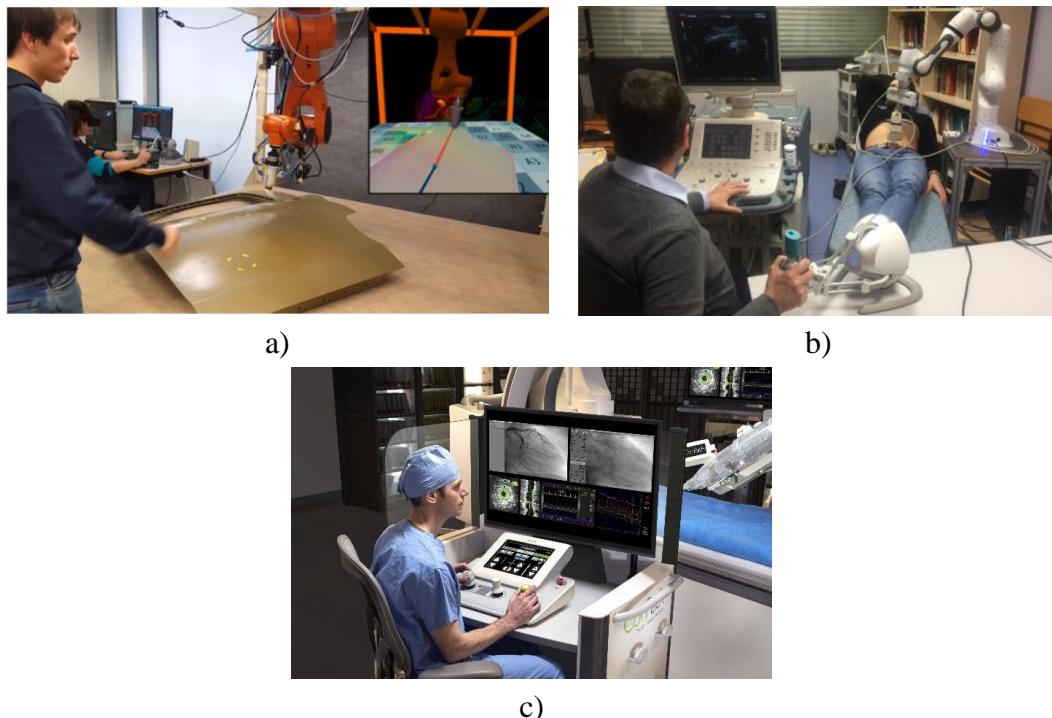
STT	Phân loại	Đặc điểm	Hình ảnh
1	Soft robot hoặc flexible robot [4-9]	Robot có cấu trúc gồm nhiều bậc tự do để robot trở nên linh động hơn trong không gian làm việc. Hình dáng chúng giống con rắn hay giun.	
2	Tensegrity robot[10, 11]	Robot có bề mặt là các mặt tiếp xúc có dạng như khối nhị thập diện	
3	Suspended cable robot[12]	Robot có cấu trúc giống như Parallel robot hoạt động của robot có thể tuyến tính, phẳng hoặc ba chiều tăng khả năng mang tải của robot cáp.	

Hiện nay trên thế giới có rất nhiều nghiên cứu liên quan đến robot cáp trong những năm trở lại đây. Trong bài nghiên cứu về điều khiển cho Cable-driven Remote Access Manipulator (CRAM) của Wilhelm năm 2017 [5]. Đề tài đã giải được động học nghịch cho robot cáp dùng phương pháp Jacobian cũng như xác định điểm kỳ dị và giữ sự ổn định cho robot sử dụng phương pháp đo đặc dựa trên phương pháp Weighted Harmonic Isotropy Measure (WHIM) để chứng minh nó vượt trội hơn các phương pháp thông thường được đánh giá trên mô phỏng. Bên cạnh đó tác giả cũng xuất bản thêm một bài báo nói về việc thiết kế mô hình robot cáp cũng là một thách thức trong việc bố trí về cách đi dây cáp cũng như điều khiển chuyển động của cáp trên mô hình [4]. Nghiên cứu nói về Cable-driven Hyper-Redundant Manipulator (CDHM) của Wenfu Xu năm 2018 [8] nói về việc thiết kế bộ truyền động bằng cáp mới về cách bố trí đi dây cáp dùng 3 động cơ để điều khiển chuyển động của khớp với 3 sợi cáp. Thiết kế gần giống với công ty OC Robotic của Mỹ đang thương mại về loại robot cáp này, đề tài đã xây dựng

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

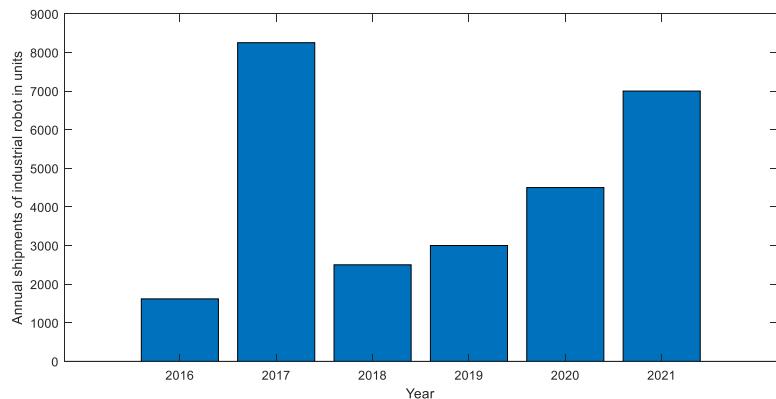
bộ điều khiển chuyển động bằng cáp của 1 cặp khớp dùng 3 motor và đã tính toán động học và động lực học áp dụng thực nghiệm trên mô hình thực. Với Nghiên cứu tiếp theo về Cable-Driven Redundant Spatial Manipulator (CRSM) của tác giả Wenfu Xu trong năm 2018 [7] cũng là cấu trúc bên trên nhưng có kết hợp thêm lò xo đàn hồi và cải thiện khả năng mang tải của robot. Trong nghiên cứu mới nhất về Cable-driven hyper-redundant manipulator (CDHM) của Yang Zheng năm 2021 [9] nói về việc tăng số bậc tự do của robot lên 24 bậc tự do và thiết kế một bộ điều khiển Puller-Follower để kích hoạt đúng cách điều khiển ba dây cáp nối chung cho 1 cặp khớp.

Với những ứng dụng của robot cáp trong thực tế thì với môi trường làm việc hẹp gấp nhiều vật cản, cũng như tìm hiểu nhiều mối nguy hại ảnh hưởng trực tiếp đến người vận hành thì việc ứng dụng hệ thống điều khiển robot từ xa là rất cần thiết. Giúp hỗ trợ tốt trong việc ứng dụng robot cáp vào trong thực tiễn. Việc ứng dụng hệ thống điều khiển từ xa cho robot hiện nay đang cực kỳ phổ biến. Ứng dụng hệ thống điều khiển robot song song 4 bậc tự do phẫu thuật từ xa của Khalifa năm 2014 [13] đã đề xuất phương pháp để đồng nhất không gian làm việc chung của hai robot có cấu trúc khác nhau có thể ứng dụng cho các hệ robot khác nhau. Hệ thống điều khiển từ xa cho Hybrid Seaded Robot với 24 cơ cấu chấp hành của Roque Saltaren năm 2018 [14] dùng cho việc khám phá lòng biển và đại dương. Một số nghiên cứu về hệ thống điều khiển được ứng dụng trên Mobile robot của Martinez năm 2020 [15] dùng để khám phá những vùng địa hình phức tạp hay bên ngoài không gian. Hệ thống điều khiển từ xa kết hợp phản hồi lực cho robot cáp là một ứng dụng rất thiết yếu giúp khai thác toàn bộ tiềm năng của robot cáp cũng như hệ thống điều khiển từ xa.



Hình 1.3: Ứng dụng của robot điều khiển từ xa; a) trong cắt bê tông kim loại; b) trong khám chữa bệnh từ xa; c) trong phẫu thuật từ xa

1.1.2 Tình hình nghiên cứu trong nước



Hình 1.4: Số lượng nhập khẩu robot ở Việt Nam giai đoạn 2016 – 2021 theo Statista

Nền kinh tế Việt Nam là một trong những nền kinh tế phát triển nhanh nhất thế giới. Nhu cầu về robot ở Việt Nam đang tăng trưởng như một xu hướng quan trọng nhằm đón đầu xu hướng Robotics và công nghệ cao để giảm nhân công và chi phí vận hành, tạo và duy trì lợi thế cạnh tranh cho các doanh nghiệp. Robot được sử dụng ngày càng phổ biến trong nhà máy sản xuất thiết bị di động, đồ uống, thực phẩm, hàng tiêu dùng, chế biến, chế tạo... Xu hướng này có thể được quan sát trong Hình 1.4.

Với những tiềm năng như trên robot trở thành một đề tài được đang được các nhà nghiên cứu ở Việt Nam quan tâm nói chung và giáo viên nói riêng. Một số công trình nghiên cứu liên quan đến robot cáp:

Bảng 1.2: Các đề tài nghiên cứu về robot cáp ở Việt Nam

STT	Tên đề tài	Tác giả	Năm	Nội dung
1	Thiết kế mô hình robot truyền động bằng cáp phục vụ phun thuốc bảo vệ thực vật trong sản xuất Nông nghiệp [16]	Nguyễn Đức Tài, PGS.TS Nguyễn Trường Thịnh	2020	Tính toán và kiểm chứng động học cho robot trên mô phỏng
2	Sử dụng robot song song 6 bậc tự do điều khiển bằng cáp cho các ứng dụng trong in bê tông 3D [17]	Ths. Tường Phước Thọ, PGS.TS Nguyễn Trường Thịnh	2021	Thiết kế cơ khí và phân tích động học cho không gian làm việc của cho robot cáp song song. Khảo sát không gian làm việc với các tải 30kg, 50kg, 60kg, 80kg. Đồng thời xây dựng bộ cảng cáp giữ cáp luôn ở một độ cảng nhất định.

Tại trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật, việc nghiên cứu các vấn đề liên quan đến robot cáp vẫn đang được đẩy mạnh nghiên cứu. Năm 2021, nhóm sinh viên Trần Thanh Hải và Đào Hùng Vương đã thực hiện đề tài “Thiết kế và chế tạo robot 7 bậc tự

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

do với cơ cấu truyền động bằng cáp” do TS. Đặng Xuân Ba hướng dẫn. Đề tài đã thiết kế và thi công thành công mô hình robot 7 bậc tự do truyền động bằng cáp. Bên cạnh đó cũng xây dựng phương pháp giải động học nghịch thông minh, các bộ điều khiển PID, SMC và giải thuật né vật vật cản cho robot được thực hiện trên mô phỏng. Cũng trong năm 2021, nhóm sinh viên Đỗ Hoàng Thái Dương, Phạm Phùng Huỳnh Đình Đại và Nguyễn Thị Ngọc Thi đã thực hiện đề tài “Thiết kế và thi công robot 7 bậc tự do với khả năng tránh vật cản linh hoạt” do TS. Đặng Xuân Ba hướng dẫn. Đề tài này đã thiết kế và thi công thành công mô hình robot 7 bậc tự do trên thực nghiệm. Kết hợp với các giải thuật tránh vật cản bằng các bộ điều khiển PID, Fuzzy và SMC trên mô phỏng và kiểm chứng động học của robot trên mô hình thực nghiệm. Bên cạnh đó cả hai đề tài cũng tồn tại một số hạn chế là cả hai đều sử dụng động cơ DC để làm cơ cấu chấp hành nên mô hình mang tính quy mô nhỏ, cáp truyền động sử dụng là loại dây cước dễ xảy ra hiện tượng giãn cáp và đứt cáp nếu vận hành lâu dài. Bên cạnh đó trong năm 2022, nhóm sinh viên Dương Minh Trí và Trần Trọng Lượng đã thực hiện đề tài “Thiết kế mô hình và bộ điều khiển chuyển động cho robot truyền động bằng cáp 6 bậc tự do dựa trên mạng CAN Bus” do TS. Trần Đức Thiện hướng dẫn. Kết quả đề tài đã chế tạo thành công mô hình thực nghiệm, xây dựng thành công hệ thống điều khiển phân tán mạng CAN 7 node cho robot cáp 6 bậc tự do. Mô phỏng kiểm chứng thành công giải thuật giải động học nghịch thông minh CCD kết hợp với đại số. Bên cạnh đó cũng tồn tại một số hạn chế. Mô hình phần cứng còn hạn chế về lựa chọn động cơ AC Servo chưa phù hợp, cáp di chuyển chưa linh động và cấu trúc robot chưa đủ động bền chắc. Giải thuật CCD kết hợp với đại số cần thực hiện lượng tính toán nhiều nên chưa thể thực hiện áp dụng trên mô hình thực. Đối với lĩnh vực điều khiển robot từ xa hiện tại vẫn còn mới trong việc áp dụng cho hệ cánh tay máy nhiều bậc tự do những cũng dần đã phổ biến ở trên hệ mobile robot. Nhưng việc điều khiển hệ cánh tay máy từ xa thì đã dần phổ biến ở trên thế giới vì tầm quan trọng cũng như là những ứng dụng thực tiễn mà nó mang lại. Do đó các hãng lớn ở thế giới đã chế tạo một số thiết bị Joystick để phục vụ điều này như Novint Falcon, Phantom, Omega 3, 3-DOF Planar Pantograph... Vì vậy việc thực hiện những nghiên cứu liên quan vấn đề này là cần thiết.

Từ những kết quả đạt được và phân tích về tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước ở trên cho thấy robot cáp nối tiếp còn mang đến nhiều tiềm năng nghiên cứu về tính ứng dụng và thực tiễn. Bên cạnh đó việc xây dựng hệ thống điều khiển từ xa kết hợp phản hồi lực cho robot cáp là cần thiết phù hợp với các ứng dụng cho robot cáp trong những khu vực làm việc đầy nguy hiểm, có không gian hạn chế và những ứng dụng trong lĩnh vực y tế. Đây cũng là động lực giúp nhóm lựa chọn thực hiện đề tài “Thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do”.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.2 Mục đích và mục tiêu của đề tài

1.2.1 Mục đích của đề tài

Cải tiến cấu trúc robot nối tiếp truyền động bằng cáp. Nghiên cứu phương pháp giải động học nghịch cho cấu trúc robot đa bậc. Điều khiển robot bằng mạng CAN. Nghiên cứu và xây dựng hệ thống điều khiển từ xa cho robot.

1.2.2 Mục tiêu của đề tài

Thiết kế và thi công mô hình robot cáp 6 bậc tự do. Tính toán động học cho robot bằng phương pháp Jacobian. Xây dựng hệ thống điều khiển từ xa không dây cho robot dùng thiết bị điều khiển là joystick Nonvint Falcon kết hợp với phản hồi lực giúp người vận hành có được sự cảm nhận xúc giác chân thực trong khi điều khiển robot.

1.3 Phương pháp nghiên cứu

- Phân tích dữ liệu: sử dụng các công cụ Matlab, QT Creator hỗ trợ quan sát và thu thập dữ liệu để vẽ đáp ứng đồ thị cũng như đưa ra một số đánh giá về kết quả của hệ thống dựa trên các bài báo ở Google Scholar để kiểm tra tính đúng đắn của kết quả
- Phân tích mô phỏng: dựa vào công cụ Simscape trên Matlab Simulink để mô phỏng giải thuật giải động học nghịch dùng phương pháp Jacobian và hệ thống điều khiển từ xa trên mô hình mô phỏng robot cáp 6 bậc tự do
- Phân tích thí nghiệm: dựa trên những kết quả đã thực hiện trên mô phỏng rồi đưa ra nhận xét trên thực nghiệm, đánh giá kết quả thực nghiệm so với lý thuyết đã được học từ các bài báo
- Các tiêu chí đánh giá hiệu quả của hệ thống: bao gồm kiểm tra sai số bám của robot so với quỹ đạo đặt, chất lượng điều khiển dựa trên các dữ liệu đã thu thập được trên mô hình

1.4 Giới hạn đề tài

- Đề tài chỉ giải quyết các vấn đề liên quan đến động học của robot
- Phương pháp đề xuất tính động học nghịch của robot chỉ giải quyết bài toán vị trí của robot, không có ràng buộc các điều kiện về hướng của robot
- Chưa đánh giá và tối ưu thời gian trễ trong hệ thống điều khiển từ xa
- Vì mô hình robot do nhóm sinh viên tự thiết kế và thi công nên chưa có cơ sở nào đánh giá mức độ bền vững, ổn định và an toàn trong quá trình hoạt động
- Vị trí ban đầu của robot được đặt thủ công nên chưa đánh giá được tính chính xác tuyệt đối của mô hình

1.5 Giới thiệu nội dung

Các chương còn lại bao gồm:

Chương 2: Cơ sở lý thuyết

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

Chương này trình bày tổng quan về robot, về động học, quy hoạch quỹ đạo cho robot. Bên cạnh đó, chương này cũng sẽ trình bày những nội dung cơ bản của mạng CAN, lý thuyết về hệ thống điều khiển từ xa, lý thuyết về phương pháp phản hồi lực, lý thuyết hệ thống điều khiển phân tán.

Chương 3: Thiết kế và thi công mô hình

Chương này trình bày tổng quan về hệ thống được thiết kế và thi công, trong đó, quy trình thiết kế và thi công mô hình robot, thiết kế và thi công mạng CAN, thiết kế và thi công tủ điện và xây dựng giao diện quan sát và thu thập dữ liệu.

Chương 4: Tính toán động học hệ thống

Chương này trình bày về tính toán và kiểm chứng động học cho joystick dùng để điều khiển robot cáp và động học của robot cáp 6 bậc tự do bằng phương pháp đại số và phương pháp Jacobian.

Chương 5: Mô phỏng hệ thống

Chương này trình bày tổng quan về hệ thống mô phỏng, mô phỏng và kiểm chứng phương pháp Jacobian dùng để giải động học nghịch cho robot, các bước xây dựng hệ thống điều khiển từ xa, mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có và không có phản hồi lực.

Chương 6: Thực nghiệm và đánh giá hệ thống

Chương này trình bày tổng quan quy trình thực nghiệm và đánh giá mạng CAN, thực nghiệm và đánh giá phương pháp truyền động bằng cáp của robot cáp, thực nghiệm và đánh giá phương pháp điều khiển robot từ xa không có phản hồi lực và có phản hồi lực.

Chương 7: Kết luận và hướng phát triển

Chương này trình bày về kết luận của đề tài đã thực hiện và các hướng có thể phát triển của đề tài.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Chương này sẽ trình bày tổng quan về robot, động học của robot quy hoạch quỹ đạo cho robot, lý thuyết về mạng CAN bus, lý thuyết về hệ thống điều khiển từ xa, lý thuyết về phương pháp phản hồi lực và lý thuyết về phương pháp điều khiển phân tán.

2.1 Tổng quan robot

Robot là những máy tự động, mô phỏng toàn bộ hoặc một phần hoạt động của con người. Robot sinh ra để thay thế con người thực hiện các công việc phức tạp, nguy hiểm. Robot được lập trình bởi một máy tính có khả năng thực hiện một loạt các hoạt động phức tạp dưới sự điều khiển của máy tính hoặc các vi mạch điện tử và khớp nối chuyển động. Hầu hết các khớp robot hoạt động thông qua động cơ điện, dạng chuyển động là dạng chuyển động quay, thích hợp sử dụng trong hệ thống tải nhẹ. Robot có ưu điểm là đáp ứng được những công việc đòi hỏi sự lắp lại, tốc độ làm việc và chính xác cao, độ bền lớn. Chúng thường được sử dụng trong các công việc lắp ráp, sản xuất, sửa chữa, làm việc trong các môi trường khắc nghiệt, độc hại, nguy hiểm.

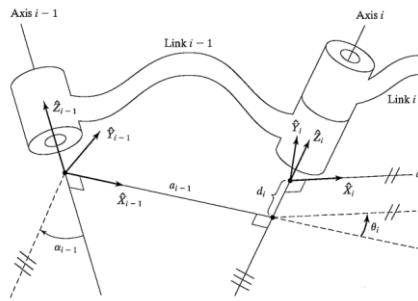
2.2 Động học robot

2.2.1 Động học thuận

Mục đích của bài toán động học thuận là xác định vị trí của khâu tác động cuối của tay máy khi biết các biến khớp của tay máy. Ngoài ra động học thuận còn được sử dụng để xác định không gian làm việc của robot. Tay máy là một chuỗi động hở, được cấu tạo bởi một số khâu (Links), được nối với nhau nhờ các khớp. Một đầu của chuỗi nối với giá (Base), còn đầu kia nối với phần công tác (End effector). Mỗi khâu hình thành cùng với khớp phía trước nó một cặp khâu khớp. Mỗi cặp khâu khớp được đặc trưng bởi hai loại thông số:

- Các thông số không thay đổi giá trị trong quá trình làm việc của tay máy được gọi là tham số
- Các thông số thay đổi giá trị khi tay máy làm việc gọi là các biến khớp

Để biểu diễn sự thay đổi giữa hệ tọa độ của các khớp liền kề (cách gọi khác giữ hệ toạ độ thứ i và hệ toại độ thứ i-1) ta sẽ thực hiện một phép biến đổi đồng nhất. Theo quy tắc Denavit-Hartenberg cho phép tổ hợp các ma trận chuyển vị riêng lẻ thành một ma trận chuyển vị thuận nhất. Sự biến đổi này cũng là một hàm chỉ có duy nhất một nghiệm, ba thông số còn lại là cố định với thiết kế cơ khí.



Hình 2.1: Thông số trong hệ trục giữa và Z_i (một cặp khâu khớp)

Trong đó: α_{i-1} là góc quay giữa trục Z_{i-1} đến Z_i quay quanh trục X_{i-1} ; a_{i-1} là khoảng cách giữa trục Z_{i-1} đến Z_i dọc theo trục X_{i-1} ; d_i là khoảng cách giữa trục X_{i-1} đến X_i dọc theo trục Z_i ; θ_i là góc quay giữa trục X_{i-1} và X_i quay quanh trục Z_i . Tính toán động học thuận bằng phương pháp Denavit-Hartenberg là phương pháp đặt các trục tọa độ tại các khớp của robot. Ta có ma trận chuyển đổi tổng quát giữa hệ trục thứ {i-1} và hệ trục thứ {i}:

$${}_{i-1}^i \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Ma trận chuyển vị của hệ từ hệ 0 đến hệ i được tính bằng cách nhân các ma trận chuyển vị ở từng khâu lại với nhau:

$${}^0_i \mathbf{T} = {}^0_1 \mathbf{T} {}^1_2 \mathbf{T} \dots {}^{i-1}_i \mathbf{T} \quad (2.2)$$

Động học thuận là quá trình tính toán vị trí và hướng của cơ cấu chấp hành cuối khi biết tất cả các giá trị biến khớp. Kết quả của quá trình này là ma trận có dạng như:

$${}^0_i \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{P}_{3 \times 3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

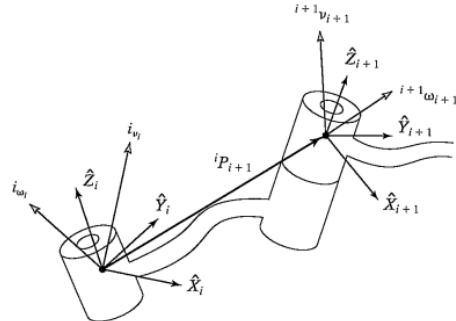
Trong đó: $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ là ma trận biểu diễn hướng của điểm đầu cuối so với tọa độ gốc; $\mathbf{P}_{3 \times 3}$ là ma trận biểu diễn vị trí của điểm đầu cuối so với tọa độ gốc.

2.2.2 Động học nghịch

Mục đích của bài toán động học nghịch là xác định các biến khớp của robot khi biết được tọa độ và hướng của cơ cấu chấp hành cuối. Một số phương pháp giải bài toán động học nghịch như: phương pháp đại số, phương pháp hình học, phương pháp số học. Robot càng nhiều bậc (đa bậc) thì việc tính toán động học nghịch càng trở nên phức tạp và cần phải áp dụng những phương pháp giải động học nghịch đặc biệt để giải quyết các bài toán này.

2.3 Lý thuyết về phương pháp Jacobian

2.3.1 Các thành phần vận tốc từ khớp tới khớp trong cánh tay robot



Hình 2.2: Hình ảnh minh họa các thành phần của cánh tay máy

Hình 2.2 mô tả các thành phần trong hệ cánh tay máy.

Vận tốc góc của link $i+1$ sẽ bằng vận tốc góc tại link thứ i cộng thêm một thành tố mới gây ra bởi vận tốc xoay tại khâu $i+1$. Công thức được viết trong khung $\{i\}$ như sau:

$${}^i\omega_{i+1} = {}^i\omega_i + {}_{i+1}{}^iR\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.4)$$

$$\text{Trong đó: } \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix}^T$$

Bằng việc sử dụng ma trận xoay liên quan đến khung $\{i\}$ và $\{i+1\}$, có thể biểu diễn chuyển động của khâu tại khung thứ i . Nhân hai vế công thức (2.4) với ${}^{i+1}R$, có thể mô tả vận tốc góc của link $i+1$ trong khung $\{i+1\}$:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.5)$$

Vận tốc tuyến tính của góc trong khung $\{i+1\}$ cũng giống như vận tốc tại khung $\{i\}$ cộng thêm một thành tố mới gây ra bởi vận tốc xoay của link thứ i .

Vận tốc dài tại hệ tọa độ $\{i+1\}$ so với hệ tọa độ $\{i\}$:

$${}^i v_{i+1} = {}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1} \quad (2.6)$$

Vận tốc dài trong hệ tọa độ $\{i+1\}$:

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R \left({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1} \right) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.7)$$

Tổng kết hai công thức cần nhớ là hai công thức sau:

$$\begin{aligned} {}^i\omega_{i+1} &= {}^i\omega_i + {}_{i+1}{}^iR\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \\ {}^{i+1}v_{i+1} &= {}^{i+1}R \left({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1} \right) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.3.2 Ma trận Jacobian

Ma trận Jacobian J theo các biến θ được xác định bởi:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \left(\frac{\partial s_i}{\partial \theta_j} \right)_{i,j} \quad (2.9)$$

Trong đó s_i là vị trí end effector thứ i ; θ_j là góc quay các khớp của robot.

Hàm cơ bản đối với động lực học thuận mô tả vận tốc của end effector được viết như sau:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}. \quad (2.10)$$

Chúng ta có giá trị hiện tại của $\boldsymbol{\theta}$, $\dot{\mathbf{s}}$, $\dot{\mathbf{t}}$, từ đó tính toán được ma trận Jacobian \mathbf{J} , sau đó cập nhật $\Delta\boldsymbol{\theta}$ để tăng hoặc giảm giá trị góc:

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} + \Delta\boldsymbol{\theta} \quad (2.11)$$

Vị trí end effector thay đổi sẽ gây ra sự thay đổi về góc khớp và được ứng lượng theo công thức sau:

$$\dot{\mathbf{s}} \approx \mathbf{J}\Delta\boldsymbol{\theta} \quad (2.12)$$

Viết lại sai số vị trí:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{J}\Delta\boldsymbol{\theta} \quad (2.13)$$

2.3.3 Phương pháp Jacobian transpose

Công thức của phương pháp Jacobian transpose được biểu diễn như sau:

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \alpha \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{e}} \quad (2.14)$$

Trong đó α là hệ số sắp xỉ.

2.3.4 Phương pháp pseudoinverse

Công thức của phương pháp pseudoinverse được biểu diễn như sau:

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{e}} \quad (2.15)$$

Trong đó ma trận \mathbf{J} theo phương pháp pseudoinverse có kích thước $n \times m$

Phương pháp pseudoinverse có xu hướng về vấn đề ổn định gần điểm kỳ dị. Tại điểm kỳ dị có sự thay đổi rất lớn đối với góc khớp của robot. Nhưng trong thực tế, xảy ra sai số nên hiếm khi đạt được điểm kỳ dị.

Phương pháp pseudoinverse có thêm thành phần khác đó là ma trận $(\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J})$

Chúng ta có thể thiết lập giá trị $\Delta\boldsymbol{\theta}$ theo công thức sau:

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^\dagger \dot{\mathbf{e}} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\dagger \mathbf{J})\boldsymbol{\phi} \quad (2.16)$$

Với bất kỳ vector $\boldsymbol{\phi}$ đều có thể đạt được giá trị $\Delta\boldsymbol{\theta}$ làm nhỏ giá trị $\mathbf{J}\Delta\boldsymbol{\theta} - \dot{\mathbf{e}}$. Bằng cách chọn $\boldsymbol{\phi}$ ổn định thì có thể đạt được vị trí theo yêu cầu. Chẳng hạn, $\boldsymbol{\phi}$ có thể được chọn để không cập nhật giá trị góc, điều này có thể giúp tránh kỳ dị.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Một dạng khác của phương pháp pseudoinverse, hàm thông thường được viết như sau:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^T \vec{\mathbf{e}} \quad (2.17)$$

Ta có công thức khác:

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T)^{-1} \vec{\mathbf{e}} \quad (2.18)$$

2.4 Quy hoạch quỹ đạo

Quy hoạch quỹ đạo là tạo các tín hiệu vào tham chiếu cho bộ điều khiển robot để robot di chuyển theo quỹ đạo mong muốn. Quỹ đạo điểm – điểm là quỹ đạo đi qua hai điểm định trước trong thời gian xác định, quỹ đạo đường là quỹ đạo đi qua nhiều điểm theo một đường liên tục xác định trước. Đồ án sử dụng đa thức bậc 3 tạo quỹ đạo cho robot.

Quy hoạch quỹ đạo theo hàm đa thức bậc 3 có dạng:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2.19)$$

Đạo hàm công thức (2.19):

$$\frac{d}{dt} q(t) = v(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (2.20)$$

Muốn vị trí cơ cấu chấp hành cuối đi qua hai điểm xác định trong không gian làm việc, từ vị trí đầu và cuối của end effector giải bài toán động học ngược, xác định các giá trị đầu và cuối cho các biến khớp $q_0 = q(t_0), q_f = q(t_f)$.

Điều kiện ban đầu:

- Tại thời điểm bắt đầu: $t = t_0, q(t_0) = q_0, \frac{d}{dt} q(t_0) = v_0$.
- Tại thời điểm kết thúc: $t = t_f, q(t_f) = q_f, \frac{d}{dt} q(t_f) = v_f$

Từ 2 điều kiện tại lúc bắt đầu và lúc kết thúc, thay vào phương trình (2.20) ta có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} q_0 = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 \\ v_0 = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 \\ q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ v_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{cases} \quad (2.21)$$

Giải hệ phương trình (2.21) ta được các nghiệm sau:

$$\begin{cases} a_0 = q_0 \\ a_1 = v_0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) - \frac{2}{t_f} v_0 - \frac{1}{t_f} v_f \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3} (q_f - q_0) + \frac{1}{t_f^2} (v_f + v_0) \end{cases} \quad (2.22)$$

Thay các nghiệm từ phương trình (2.22) vào phương trình (2.20), ta được:

$$\begin{aligned} q(t) = q_0 + v_0 t + & \left(\frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) - \frac{2}{t_f} v_0 - \frac{1}{t_f} v_f \right) t^2 \\ & + \left(-\frac{2}{t_f^3} (q_f - q_0) + \frac{1}{t_f^2} (v_f + v_0) \right) t^3 \end{aligned} \quad (2.23)$$

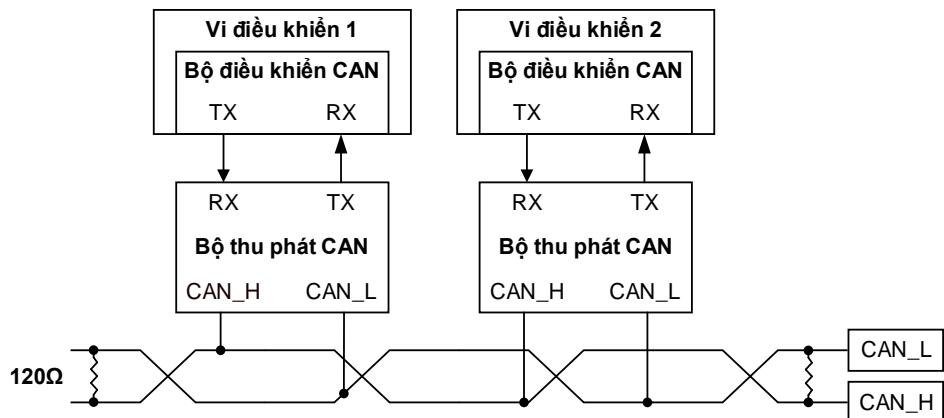
Nếu ta chọn vận tốc đầu và vận tốc cuối là 0 thì phương trình (2.23) trở thành:

$$q(t) = q_0 + \left(\frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) \right) t^2 + \left(-\frac{2}{t_f^3} (q_f - q_0) \right) t^3 \quad (2.24)$$

2.5 Lý thuyết về mạng CAN bus

2.5.1 Tổng quan về mạng CAN bus

CAN – Controller Area Network là một giao thức truyền thông bus nối tiếp chỉ thông qua 2 dây (CAN-High và CAN-Low), phát triển bởi Bosch (Đức) vào đầu những năm 1980. Sau đó, CAN đã được chuẩn hoá theo tiêu chuẩn ISO-11898 và ISO-11519, thiết lập chính nó như là giao thức chuẩn để giao tiếp kết nối mạng trong ngành công nghiệp ô tô. Thời gian đầu giao tiếp CAN được phát triển chủ yếu hỗ trợ cho ngành công nghiệp xe, vì vậy nó đã được sử dụng trong xe ô tô chở khách, xe tải, tàu thuyền và các loại xe khác. Ngày nay giao thức CAN được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác trong các ứng dụng với tên gọi là mạng điều khiển nhúng (networked embedded control), bao gồm cả tự động hóa công nghiệp, xây dựng tự động hóa, máy dệt, các loại máy móc sản xuất...



Hình 2.3: Mô hình tổng quan về cấu trúc mạng CAN

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Dựa vào Hình 2.3, cấu trúc mạng CAN sẽ bao gồm nhiều node khác nhau. Trong đó mỗi node bao gồm cấu trúc như sau:

- Bộ điều khiển CAN: trong cấu trúc mạng CAN khói điều khiển sẽ đóng vai trò xử lý tín hiệu khi các node trao đổi thông tin với nhau
- Bộ thu phát CAN: dữ liệu sau khi được xử lý sẽ được bộ thu phát chuyển đổi tín hiệu dưới dạng các bit số 0 và 1 dựa trên mức điện áp chênh lệch ở hai kênh CAN HIGH và CAN LOW

Đặc điểm của mạng CAN 2.0 được thể hiện dưới đây:

Bảng 2.1: Thông số kỹ thuật CAN 2.0

Số lượng dây	2 dây
Kích thước dữ liệu	Tối đa 8 byte/Frame
Tốc độ truyền	Tối đa 1Mbps trong phạm vi 40m
Phạm vi tối đa	6 km với tốc độ 10Kbps
Số node tối đa	127 node
Phương pháp tránh xung đột dữ liệu	Dựa trên ưu tiên của ID gói tin
Phương pháp đọc tín hiệu trên bus	Dựa trên sự chênh lệch điện áp 2 dây CAN

Cơ chế phân xử không phá hủy (non-destructive arbitration mechanism) có nghĩa là dữ liệu truyền lên đường bus có thể truy cập và nhận dữ liệu từ bất kỳ node nào, bất cứ node nào cũng có thể lấy và có phân xử ưu tiên.

Bus truy cập với khung với mức độ ưu tiên cao nhất mà không có bị delay.

Cơ chế phát hiện lỗi: Ngắt kết nối với node bus bị lỗi mà vẫn duy trì liên lạc giữa các nút còn lại.

Các khung truyền không được xác định bằng địa chỉ các nút, mà được xác định bằng nội dung của chúng.

Cấu hình hệ thống đơn giản. Giảm khối lượng dây dẫn. Cải thiện độ tin cậy của hệ thống khả năng tương thích với các công cụ chuẩn đoán.

Trong mạng CAN có đến 5 bộ phận có thể phát hiện ra lỗi nên việc sửa lỗi cũng thuận tiện. Chi phí xây dựng mạng thấp do thuận tiện cho việc nối dây và giảm thiểu được lỗi cho hệ thống.

Có tính linh hoạt cao: dễ dàng và thuận tiện cho việc nâng cấp và mở rộng, với mức ưu tiên cao và bảo mật thông qua bộ lọc ID.

2.5.2 Các loại khung truyền

Dữ liệu CAN được truyền dưới dạng các frame (khung dữ liệu), được cấu tạo gồm nhiều bit với những chức năng khác nhau. Có 4 loại frame dữ liệu:

- Data frame (khung dữ liệu): là khung mang dữ liệu từ một bộ truyền dữ liệu đến các bộ phận dữ liệu

- Remote frame (khung yêu cầu hay khung điều khiển): là khung được truyền từ một node để yêu cầu node khác truyền khung dữ liệu có ID trùng với khung yêu cầu
- Error frame (khung báo lỗi): là khung được truyền bởi bất kỳ node nào khi node đó phát hiện lỗi bus
- Overload frame (khung báo quá tải): được sử dụng để tạo thêm độ trễ giữa các khung dữ liệu hoặc khung yêu cầu. Mỗi node trong bus CAN có thể truyền bất kỳ khi nào nếu phát hiện bus rãnh, nếu một node nhận quá nhiều dữ liệu, nó có thể dùng khung này để ngăn sự truyền tiếp theo. Ngày nay các bộ điều khiển CAN đủ tốt và thông minh để không cần sử dụng frame này

Chỉ có khung dữ liệu và khung yêu cầu là có ID, cơ chế phân xử sẽ áp dụng cho hai loại khung này khi chúng được truyền trên bus. Khung dữ liệu và khung yêu cầu có hai định dạng khác nhau là định dạng chuẩn (Standard) và định dạng mở rộng (Extended):

- Định dạng khung chuẩn sử dụng ID có độ dài 11 bit
- Định dạng khung mở rộng sử dụng ID có độ dài 29 bit

Chuẩn CAN 2.0A chỉ quy định sử dụng loại khung chuẩn. Chuẩn CAN 2.0B sử dụng cả loại khung chuẩn và khung mở rộng

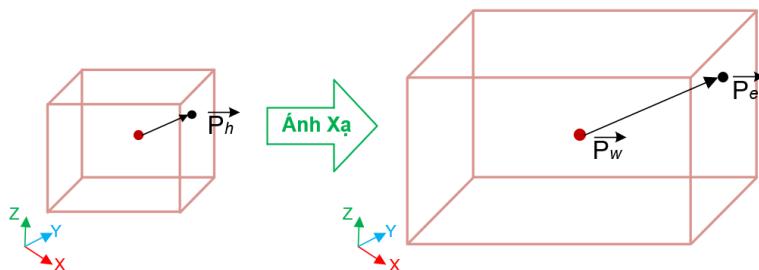
2.6 Lý thuyết về hệ thống điều khiển robot từ xa

Hệ thống điều khiển robot từ xa là một hệ thống cho phép người dùng điều khiển robot thực hiện các thao tác điều khiển từ xa bằng cách sử dụng các thiết bị như điều khiển từ xa joystick, thiết bị điện thoại, thiết bị phản hồi lực... Với việc áp dụng các thiết bị phản hồi lực như Novint Falcon.

Phương pháp position-mapping [13, 18, 19] được áp dụng theo công thức sau:

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{K}\mathbf{P}_h + \mathbf{P}_w \quad (2.25)$$

Trong đó: \mathbf{P}_e là vị trí đầu cuối của robot, \mathbf{P}_h là vị trí của joystick và \mathbf{P}_w là vị trí không gian làm việc ảo tại vị trí trong vùng làm việc robot, $\mathbf{K} = \text{diag}([k_x \ k_y \ k_z])$ là hệ số khuếch đại không gian làm việc.



Hình 2.4: Sơ đồ mô tả phương pháp ánh xạ

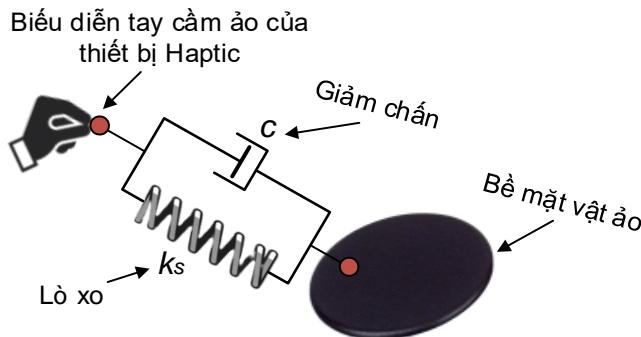
Để xác định được các hệ số ánh xạ thì ta phải có được vùng không gian làm việc mong muốn ở slave robot và vùng không gian làm việc có thể di chuyển ở master robot. Sau đó ta sẽ có vùng không gian làm việc chung của 2 robot dựa vào việc tính toán các hệ số \mathbf{K} và \mathbf{P}_w :

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \frac{\mathbf{P}_{e(\max)} - \mathbf{P}_{e(\min)}}{\mathbf{P}_{h(\max)} - \mathbf{P}_{h(\min)}} \\ \mathbf{P}_w = \frac{\mathbf{P}_{e(\max)} + \mathbf{P}_{e(\min)}}{2} - \mathbf{K} \frac{\mathbf{P}_{h(\max)} + \mathbf{P}_{h(\min)}}{2} \end{cases} \quad (2.26)$$

Ta sẽ chọn hai thông số trên sao cho vùng làm việc chung của 2 robot là tối đa.

2.7 Lý thuyết về phương pháp phản hồi lực

Công thức áp dụng cho phương pháp phản hồi lực đơn giản là tạo ra một lò xo, để khi ta di chuyển ra ngoài vùng không gian làm việc thì như việc ta đẩy lò xo nén lại. Lò xo có xu hướng tạo ra một lực tác động ngược lại lực gây ra biến dạng lò xo theo định luật Hooke.



Hình 2.5: Tạo ra đối tượng ảo để điều khiển lực tạo ra bởi thiết bị phản hồi lực

Lực đàn hồi của lò xo có thể tính toán bằng công thức đơn giản như sau [20]:

$$f = k_s \Delta x \quad (2.27)$$

Trong đó f là lực tác động, k_s là hệ số độ cứng của lò xo và Δx là chiều dài thay đổi của lò xo.

Để nhận biết các điểm tiếp xúc cứng, nên sử dụng giá trị lớn cho hằng số lò xo. Tuy nhiên, do độ cứng hạn chế của thiết bị phản hồi lực thường giá trị của k_s không thể tăng lên để cảm nhận chân thực độ cứng bề mặt tiếp xúc. Việc áp dụng thêm cơ chế giảm chấn giúp ổn định lực tác động lên người dùng một cách từ từ, tăng sự cảm nhận xúc giác cho người dùng, dưới đây là công thức mô tả về phương pháp phản hồi lực [21-23].

$$f = k_s \Delta x + cv \quad (2.28)$$

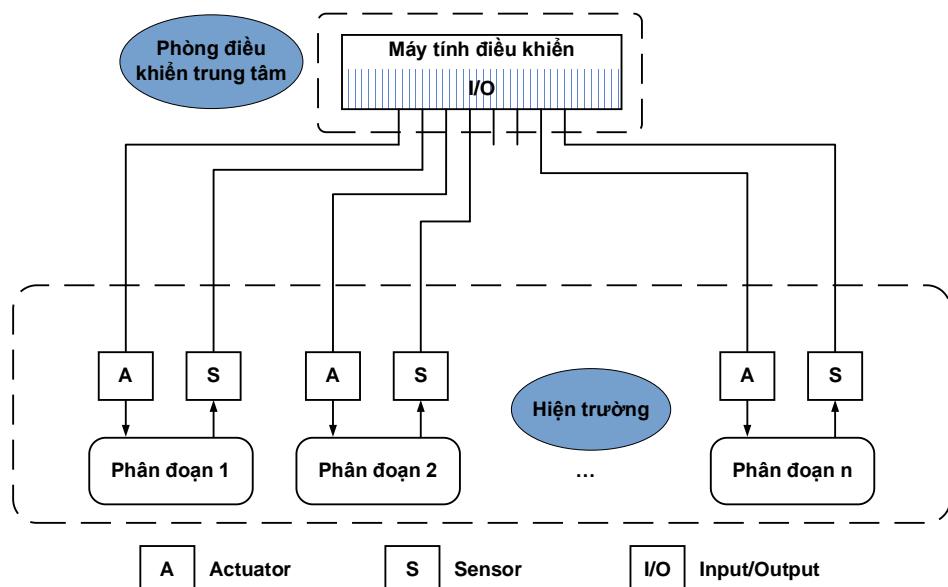
Trong đó c là hệ số giảm chấn, $v = \Delta \dot{x}$ là tốc độ thay đổi chuyển động của chiều dài lò xo.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Việc thêm yếu tố giảm chấn để hỗ trợ ổn định phần xúc giác, lực sẽ được ổn định dần dần đến khi không di chuyển nữa thì toàn bộ lực tác động bằng lực nén của lò xo.

2.8 Lý thuyết về hệ thống điều khiển phân tán

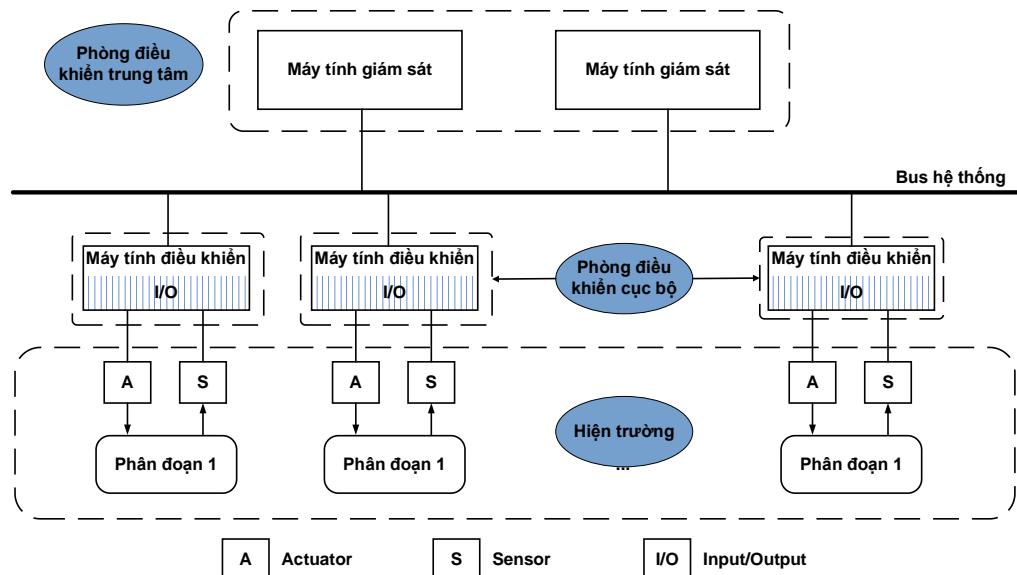
Hai loại kiến trúc điều khiển rất phổ biến trong lĩnh vực điều khiển và tự động hóa là kiến trúc điều khiển tập trung và kiến trúc điều khiển phân tán. Mỗi kiến trúc có các thành phần, cấu trúc khác nhau phù hợp với các ứng dụng khác nhau. Kiến trúc điều khiển tập trung được mô tả cụ thể trong Hình 2.6 và kiến trúc điều khiển phân tán được mô tả cụ thể trong Hình 2.7.



Hình 2.6: Kiến trúc điều khiển tập trung

Kiến trúc điều khiển điều khiển tập trung (Centerized Control System – CCS) dùng một máy tính duy nhất để điều khiển toàn bộ quá trình kỹ thuật. Máy tính điều khiển (MTĐK) có thể là các bộ điều khiển số trực tiếp – Direct Digital Control (DDC), máy tính lớn, máy tính cá nhân hoặc các thiết bị điều khiển khả trình. Trong thực tế, máy tính điều khiển thông thường tập trung ở các phòng điều khiển, cách xa hiện trường. Trong hệ thống điều khiển tập trung, các tín hiệu và thông tin từ các thành phần và cảm biến bên trong hệ thống được gửi về trung tâm điều khiển và từ đó quyết định điều khiển và tác động lên các đối tượng hoạt động của hệ thống. Việc truyền nhận tín hiệu bên trong hệ thống điều khiển tập trung có thể được thực hiện dưới hình thức có dây hoặc không dây, song chúng đề hội tụ tại máy tính điều khiển trung tâm. Kiến trúc điều khiển tập trung thường ứng dụng trong các dự án tự động hóa với quy mô vừa và nhỏ, điều khiển máy móc và thiết bị bởi sự đơn giản.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT



Hình 2.7: Kiến trúc điều khiển phân tán

Kiến trúc điều khiển phân tán (Distributed Control System – DCS) là một hình thức kiến trúc điều khiển trong đó quyết định và điều khiển của hệ thống được phân tán và phân chia giữa các thành phần và đơn vị điều khiển khác nhau. Thay vì tập trung tại một trung tâm điều khiển duy nhất như trong hệ thống điều khiển tập trung, kiến trúc điều khiển phân tán cho phép quyết định và điều khiển được thực hiện một cách phân tán và cục bộ trên các thành phần của hệ thống. Trong kiến trúc điều khiển phân tán, các thành phần và đơn vị điều khiển trong hệ thống có khả năng tương tác và trao đổi thông tin với nhau để thực hiện các quyết định điều khiển phù hợp. Mỗi thành phần có thể có vai trò cảm biến, bộ điều khiển hay thực thi các hành động cụ thể, và có khả năng liên lạc và gửi/nhận thông tin với các thành phần khác trong hệ thống.

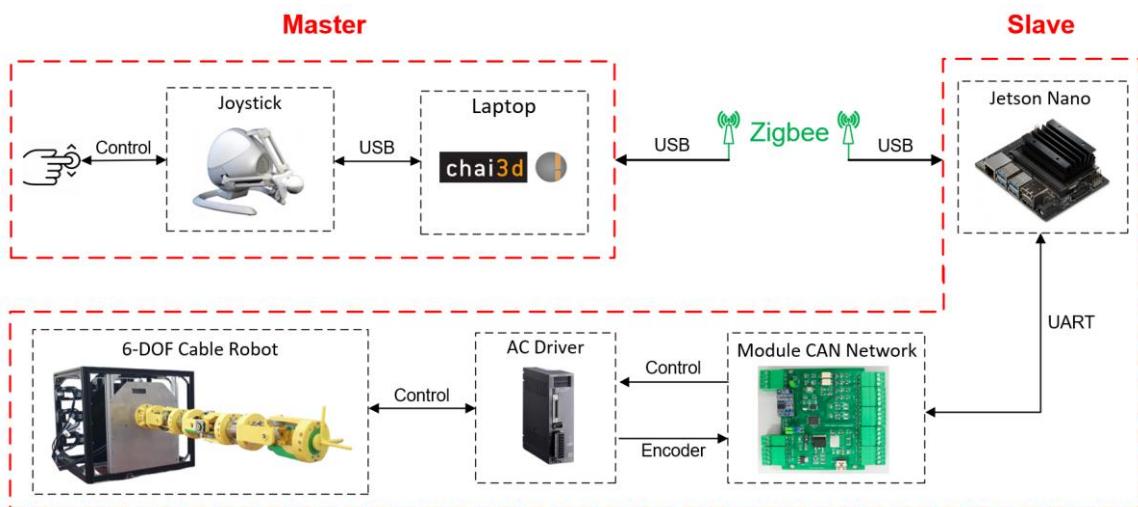
Kiến trúc điều khiển phân tán mang lại một số lợi ích quan trọng. Đầu tiên, nó giúp tăng tính linh hoạt và độ tin cậy của hệ thống. Bằng cách phân tán quyết định và điều khiển, nếu một thành phần gặp sự cố, các thành phần khác vẫn có thể tiếp tục hoạt động và đảm bảo tính ổn định của hệ thống. Thứ hai, kiến trúc điều khiển phân tán cung cấp khả năng mở rộng linh hoạt cho hệ thống. Các thành phần có thể được thêm vào hoặc loại bỏ một cách dễ dàng mà không ảnh hưởng đến các thành phần khác. Thứ ba, kiến trúc này cũng tạo điều kiện cho sự phân tách chức năng và quản lý của hệ thống, cho phép sự phát triển độc lập và tối ưu hóa của các thành phần.

Kiến trúc điều khiển phân tán được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, bao gồm điều khiển công nghiệp, hệ thống mạng thông tin, hệ thống điều khiển giao thông, và các hệ thống tự động phân tán khác. Đặc biệt, với sự phát triển của công nghệ thông tin và truyền thông, kiến trúc điều khiển phân tán ngày càng trở nên phổ biến và quan trọng trong việc xây dựng các hệ thống điều khiển phức tạp, đáp ứng yêu cầu của thế giới kỹ thuật số hiện đại.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

Chương này sẽ trình bày các bước thiết kế và xây dựng hệ thống, bao gồm thiết kế và thi công mô hình robot, mạng truyền thông CAN bus, tủ điện và các bước xây dựng phương pháp ánh xạ không gian làm việc, xây dựng giao diện tương tác người dùng.

3.1 Tổng quan về hệ thống thi công

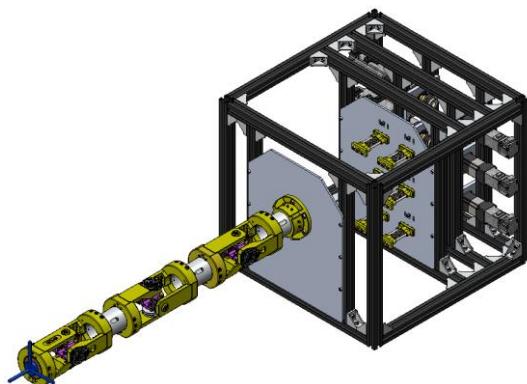


Hình 3.1: Tổng quan về hệ thống điều khiển từ xa robot cáp

Hệ thống điều khiển từ xa được thực hiện trong đề tài này bao gồm một master và một slave. Trong đó, hệ thống master bao gồm một 3D joystick (Nonvint Falcon joystick) và một máy tính. Thiết bị joystick này có bản chất là một robot Delta, có nhiệm vụ tạo tín hiệu đặt, tiền đề cho quỹ đạo chuyển động của robot trước khi ánh xạ không gian làm việc. Máy tính trên hệ thống master có nhiệm vụ đọc tín hiệu từ joystick, thực hiện ánh xạ vị trí của joystick sang vị trí của robot cáp trên hệ thống slave và sau đó gửi những tín hiệu này đi bằng giao thức vô tuyến không dây (Zigbee). Bên cạnh đó, máy tính trên hệ thống master còn có nhiệm vụ tính toán phản hồi lực cho thiết bị joystick điều khiển để tạo cảm giác chân thực cho người vận hành khi thao tác điều khiển trên joystick. Hệ thống slave bao gồm một máy tính nhúng Jetson Nano, mạng CAN, các driver điều khiển động cơ AC Servo và cơ cấu chấp hành AC Servo. Hệ thống slave có nhiệm vụ nhận tín hiệu đặt từ hệ thống master và tính toán động học nghịch cho robot bằng phương pháp Jacobian và điều khiển đồng bộ 6 khớp của robot cáp thông qua mạng CAN. Dựa vào mô hình tổng quan trên, nhóm tiến hành thiết kế và thi công mô hình robot cáp 6 bậc tự do, thiết kế và thi công mạng truyền thông CAN, thiết kế thi công tủ điện điều khiển, xây dựng phương pháp ánh xạ không gian làm việc cho robot, xây dựng giao diện thu thập và quan sát dữ liệu cho hệ thống.

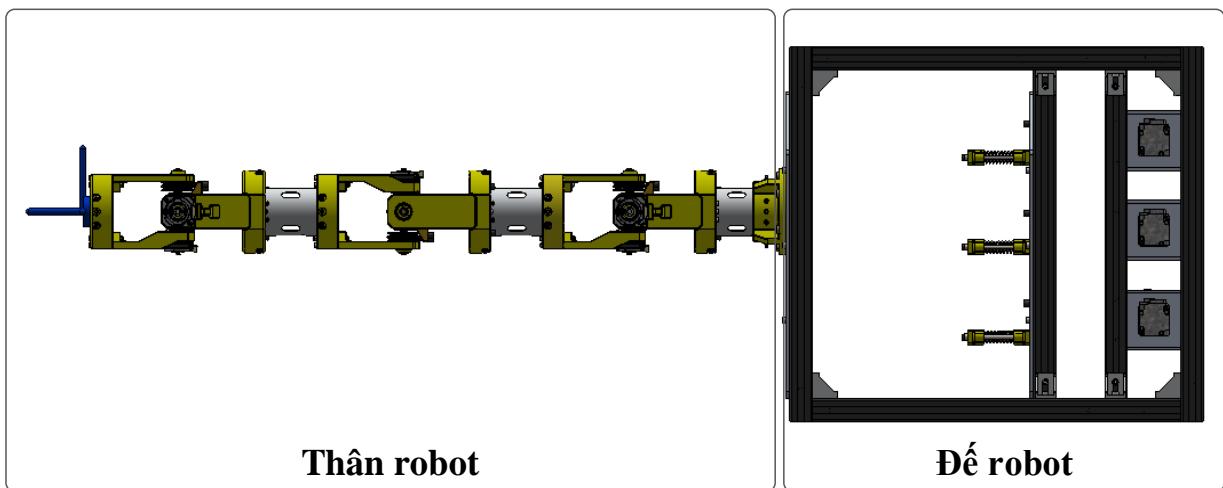
3.2 Thiết kế và thi công mô hình robot

3.2.1 Thiết kế mô hình robot



Hình 3.2: Tổng quan mô hình 3D robot 6 bậc tự do

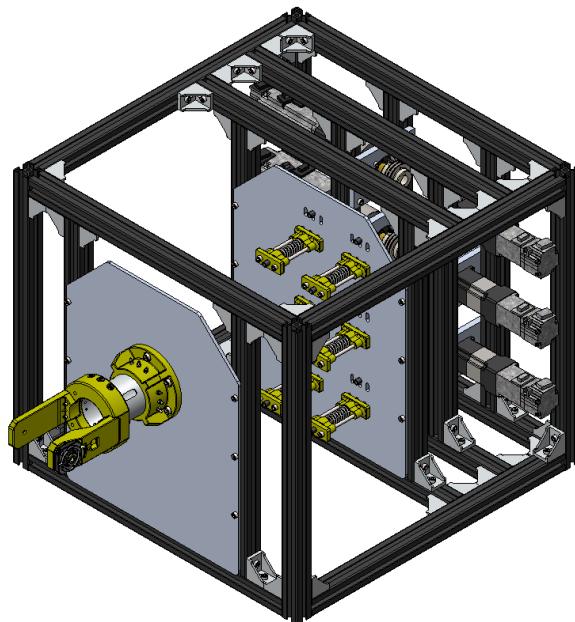
Mô hình 3D của robot cáp 6 bậc tự do được thiết kế trên phần mềm SolidWorks và được minh họa bằng Hình 3.2. Mô hình robot bao gồm 2 thành phần chính là đế robot và thân robot được mô tả trong Hình 3.3. Đế robot được làm bằng khung nhôm định hình, là nơi để bố trí động cơ. Thân robot bao gồm 4 khâu (khâu 0, khâu 1, khâu 2 và khâu cuối – end-effector) và 6 khớp xoay tương ứng với 3 khớp nối vạn năng (universal joint).



Hình 3.3: Cấu trúc tổng quan mô hình 3D robot

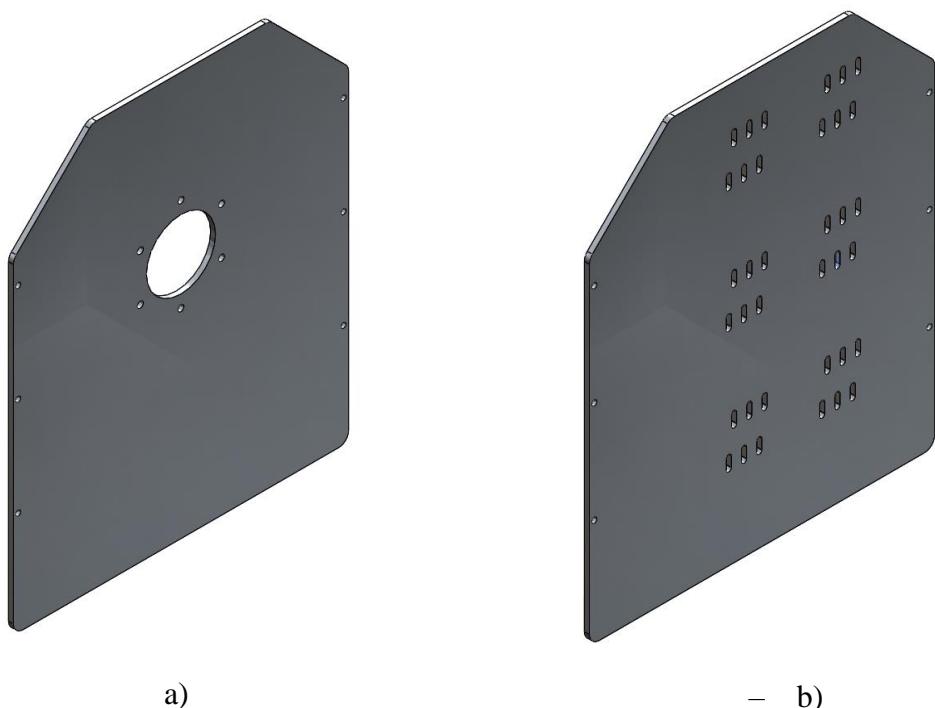
3.2.1.1 Thiết kế đế robot

Đế robot được thiết kế từ nhôm định hình và thép tấm, để là nơi bố trí động cơ truyền động cho 6 khớp của robot và bố trí các bộ cảng cáp.

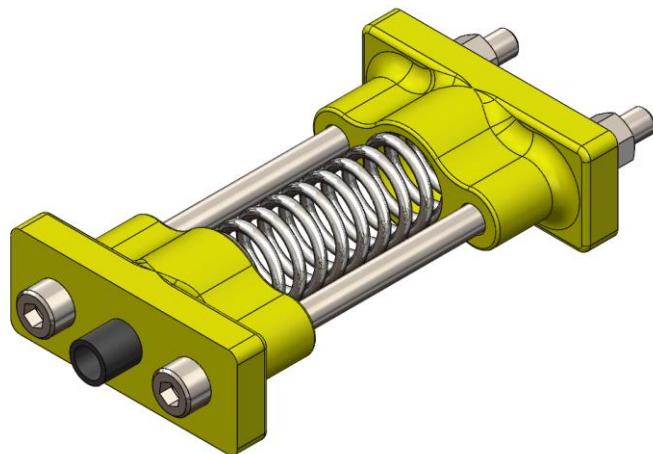


Hình 3.4: Mô hình đế robot

Khung đế được ghép từ các thanh nhôm định hình 30x30 cm với kích cỡ 50x50x50 cm (dài, rộng cao). Khung đế có 2 tấm thép dày 5mm với tấm thứ nhất dùng để kê nối phần đế robot với khung 1 (Hình 3.5) và tấm thứ 2 dùng để bố trí các bộ cảng cáp (Hình 3.6). Bộ động cơ và hộp số AC Servo được lắp ghép với các thanh nhôm định hình của khung đế bởi một tấm thép nhỏ dày 10mm (Hình 3.7).



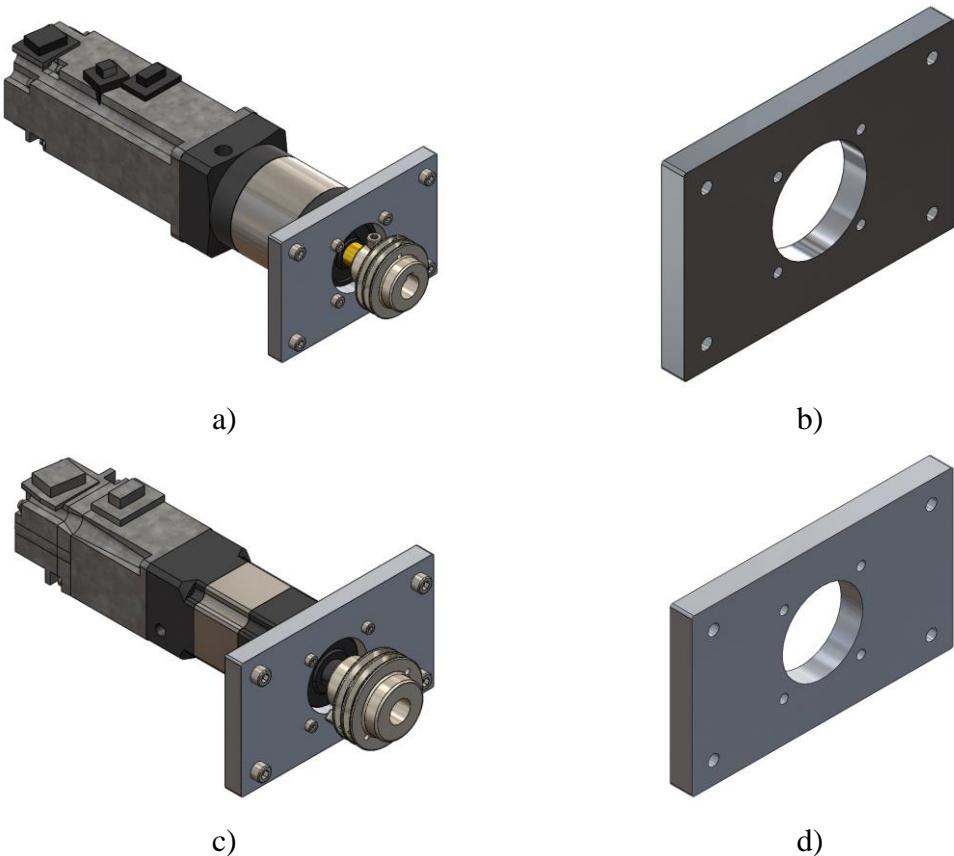
Hình 3.5: Mô hình 3D hai tấm nhôm ở đế robot a) tấm nhôm thứ 1; b) tấm nhôm thứ 2



Hình 3.6: Mô hình 3D cơ cấu căng cáp

Cơ cấu căng cáp sử dụng một lò xo có nhiệm vụ đùn vỏ cáp, làm cong vỏ cáp và từ đó làm căng sợi cáp bên trong vỏ. Với mỗi bậc tự do của robot, nhóm sử dụng một bộ căng cáp.

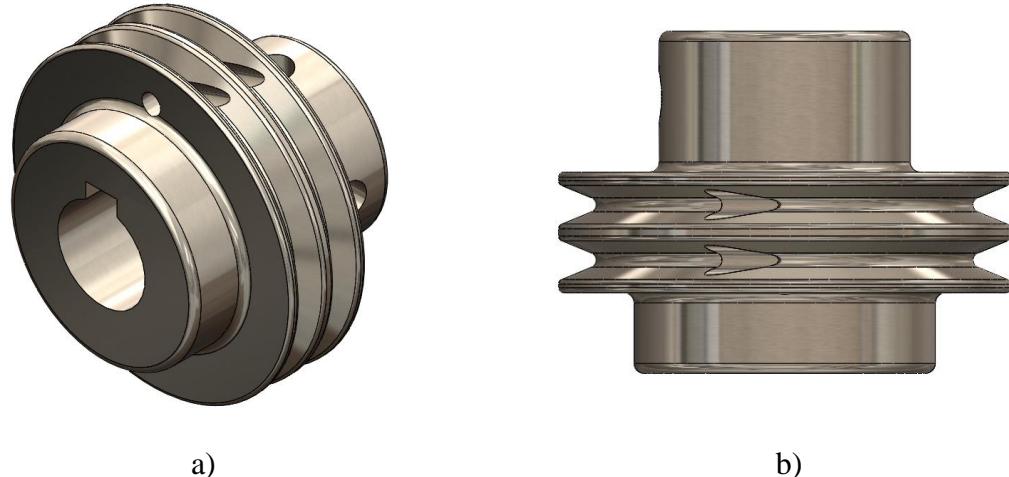
Phần khung đế của robot cũng là nơi bố trí các động cơ truyền động cho robot. Các động cơ AC Servo và hộp số được ghép với nhau và dùng các tấm thép dày 10mm để giữ các động cơ này cố định trên các thanh nhôm định hình của khung đế robot.



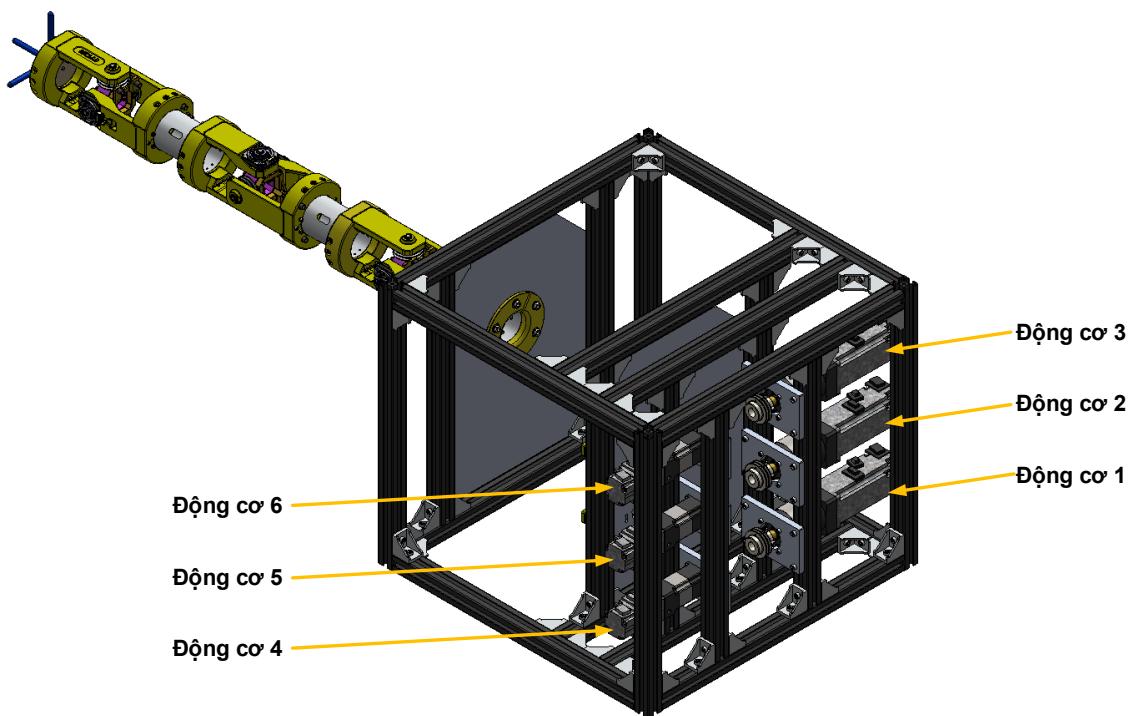
Hình 3.7: Mô hình 3D bộ động cơ ở đế robot a) bộ động cơ 400W và hộp số; b) nẹp bộ động cơ 400W; c) bộ động cơ 100W và hộp số; d) nẹp bộ động cơ 100W

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

Các động cơ AC Servo được bố trí trên khung đế robot như Hình 3.9, trong đó, các động cơ 400W có kích thước lớn hơn được bố trí bên phải, có nhiệm vụ truyền động cho khớp 1, 2 và 3 của robot và các động cơ 100W có kích thước nhỏ hơn được bố trí bên trái, có nhiệm vụ truyền động cho khớp 4, 5 và 6. Pulley được thiết kế với các rãnh và lỗ phù hợp cho việc truyền động bằng cáp.



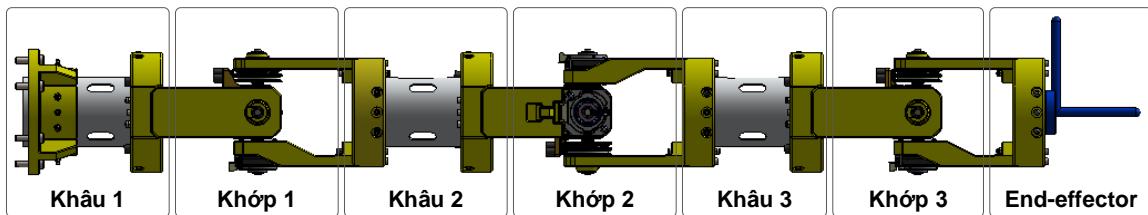
Hình 3.8: Mô hình 3D pulley động cơ ở đế robot a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn từ trên xuống



Hình 3.9: Thứ tự động cơ trên mô hình 3D

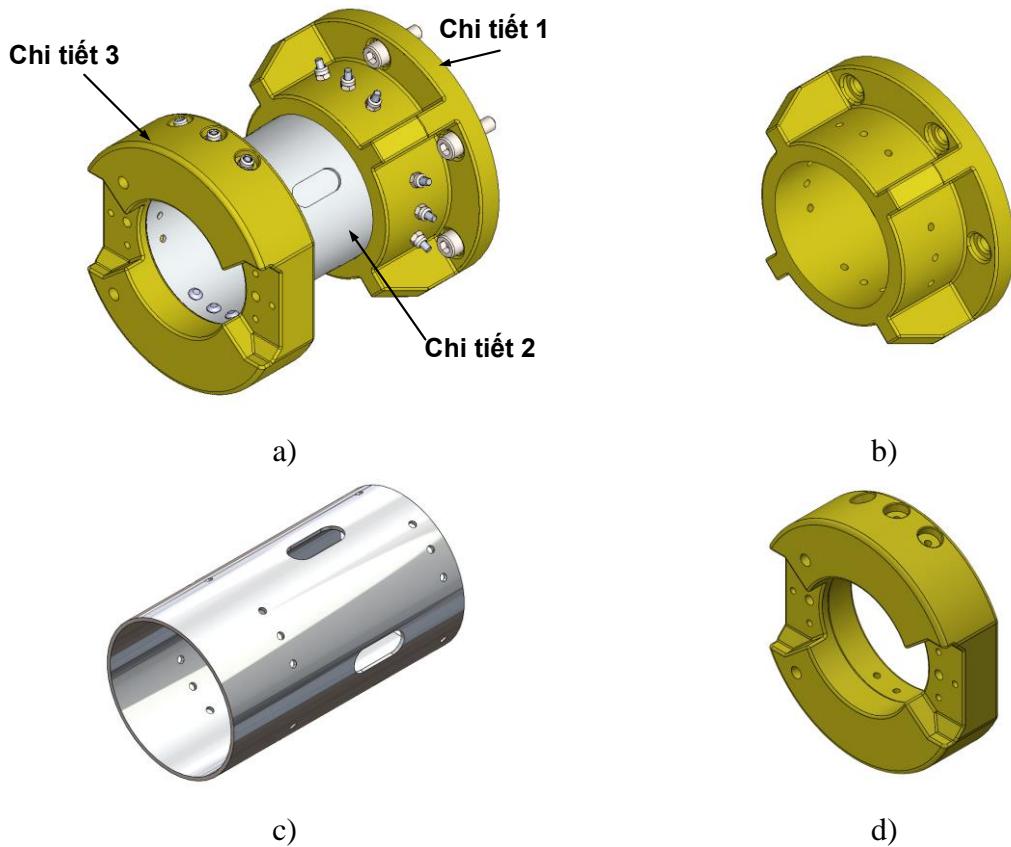
3.2.1.2 Thiết kế thân robot

Thân robot có tất cả 7 thành phần, bao gồm 4 khâu, lần lượt là khâu 1, khâu 2, khâu 3, và khâu cuối (end-effector) và 3 khớp vạn năng (universal joint), với mỗi khớp vạn năng tương ứng với 2 bậc tự do của robot, cấu trúc thân robot được mô tả trong Hình 3.10.



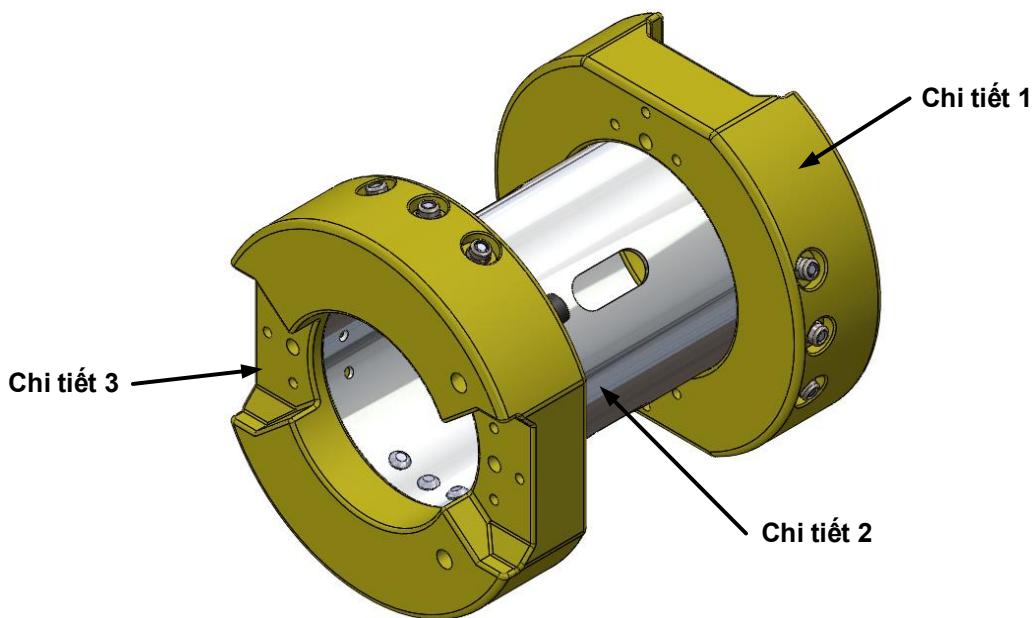
Hình 3.10: Cấu trúc mô hình 3D thân robot

Các khung và khớp của robot cáp được thiết kế dạng module có thể dễ dàng lắp ghép và tháo rời. Bên cạnh đó việc thiết kế dạng module cũng cho phép việc tăng số lượng khớp dễ dàng hơn vì chỉ cần bổ sung những khung và khớp mới vào mô hình sẵn có. Bởi vì các module khung và khớp có cấu trúc tương tự nhau nên sau đây sẽ trình bày cấu tạo của một cặp khung khớp.



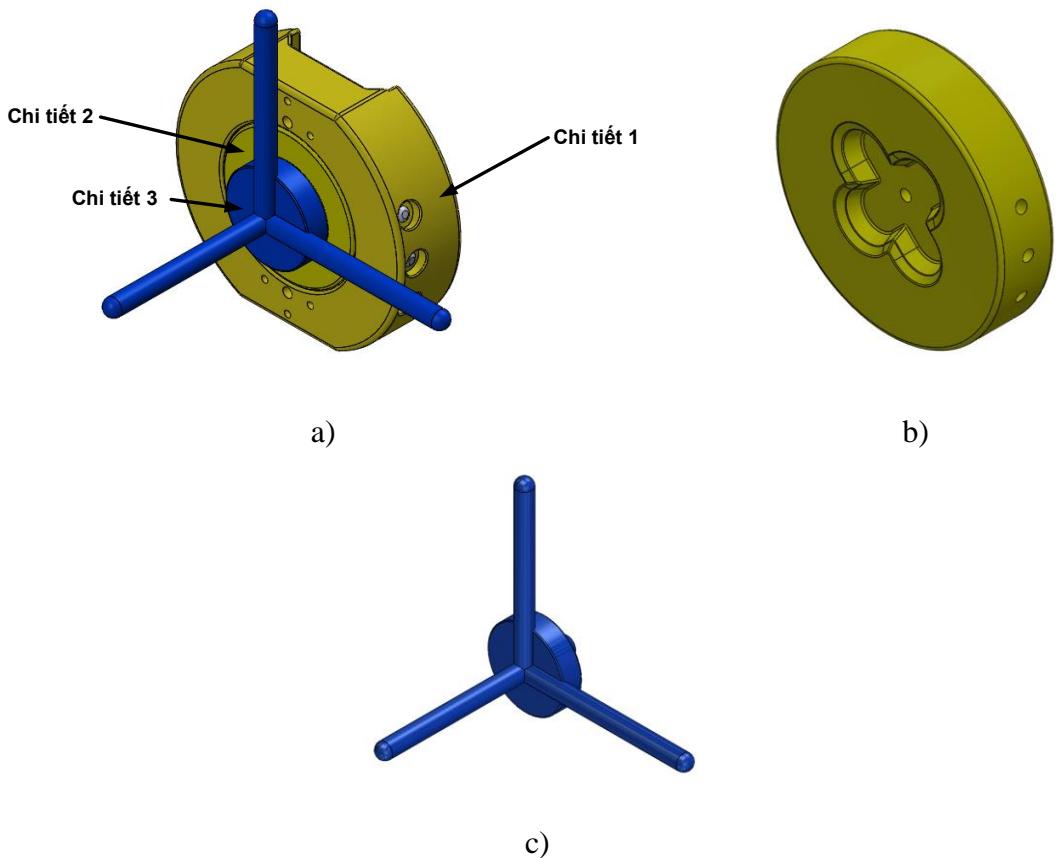
Hình 3.11: Mô hình 3D khung 1 a) mô hình lắp ghép; b) chi tiết 1; c) chi tiết 2; d) chi tiết 3

Cấu tạo khớp 1 của robot bao gồm 3 chi tiết, chi tiết 1 và 3 được kết nối với chi tiết 2 bằng các bu lông và đai ốc. Khung 2 và khung 3 của robot cũng có cấu trúc tương tự như khung 1 và được mô tả trong hình ảnh dưới đây:



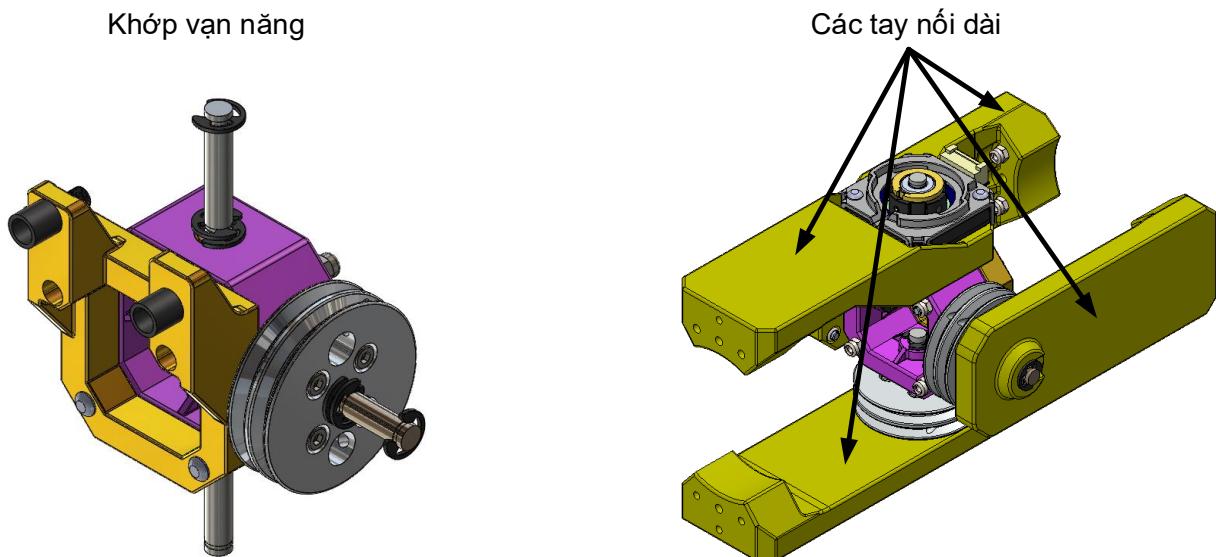
Hình 3.12: Mô hình 3D của khâu 2 và khâu 3

Khâu cuối của robot bao gồm 3 chi tiết cho phép lắp ghép dễ dàng các cơ cấu chấp hành (end – effector) có hình dạng khác nhau và được minh họa trong Hình 3.13.



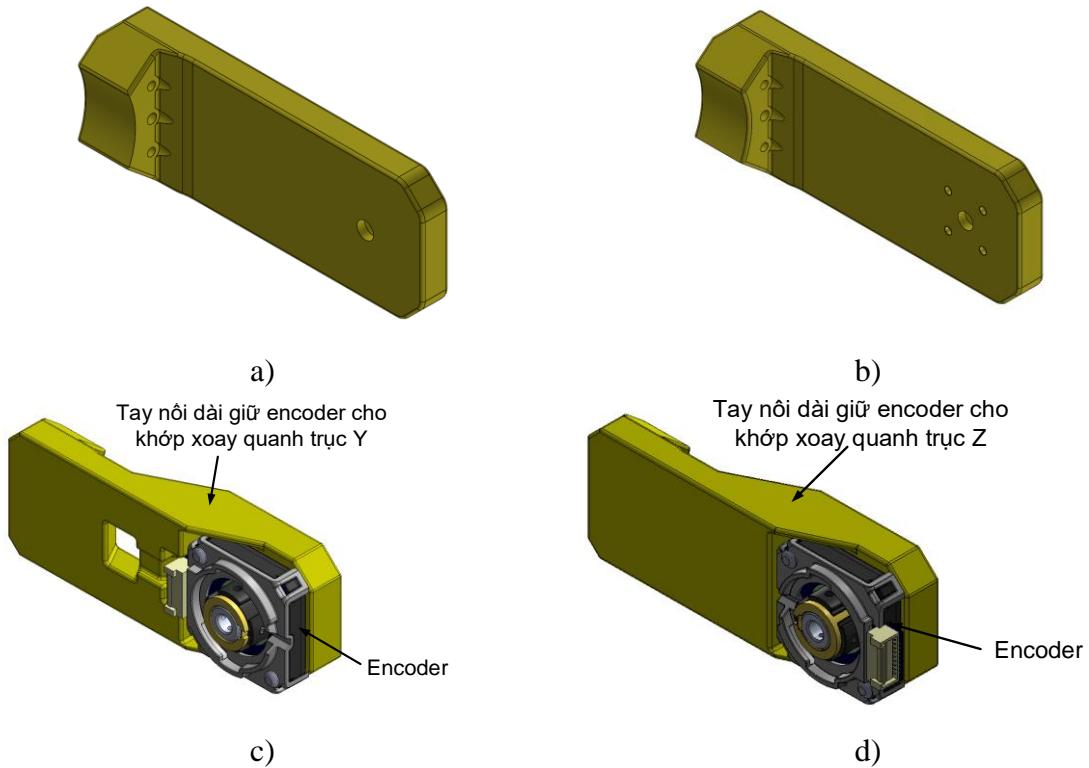
Hình 3.13: Mô hình 3D khâu cuối của robot a) mô lắp ghép; b) chi tiết 2; c) chi tiết 3

Các khớp của robot được thiết bao gồm 2 thành phần chính là các tay nối dài và khớp vạn năng (universal joint), được mô tả cụ thể như sau:



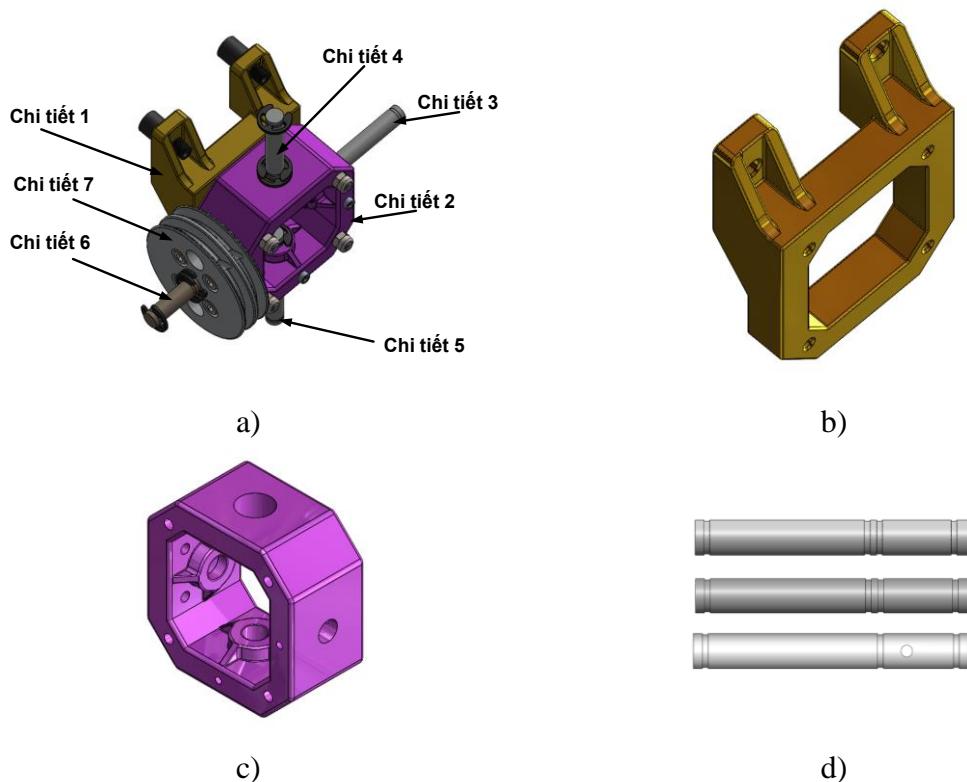
Hình 3.14: Mô hình 3D của khớp robot

Mỗi khớp vạn năng có 4 tay nối dài, trong đó có 1 tay nối dài giữ pulley xoay quanh trục Y, 1 tay nối dài giữ pulley xoay quanh trục Z, và 2 tay nối dài giữ encoder cho các khớp xoay quanh trục Y và trục Z. Các chi tiết này được mô tả cụ thể trong hình bên dưới:



Hình 3.15: Mô hình 3D tay nối dài a) giữ pulley xoay quanh trục Y; b) giữ pulley xoay quanh trục Z; c) giữ encoder cho khớp xoay quanh trục Y; d) giữ encoder cho khớp xoay quanh trục Z

Mô hình 3D của khớp robot bao gồm 7 chi tiết và được mô tả trong Hình 3.15.



Hình 3.16: Mô hình 3D khớp vạn năng của robot a) mô hình lắp ghép; b) chi tiết 1; c) chi tiết 2; d) chi tiết 3, 4, 5, và 6

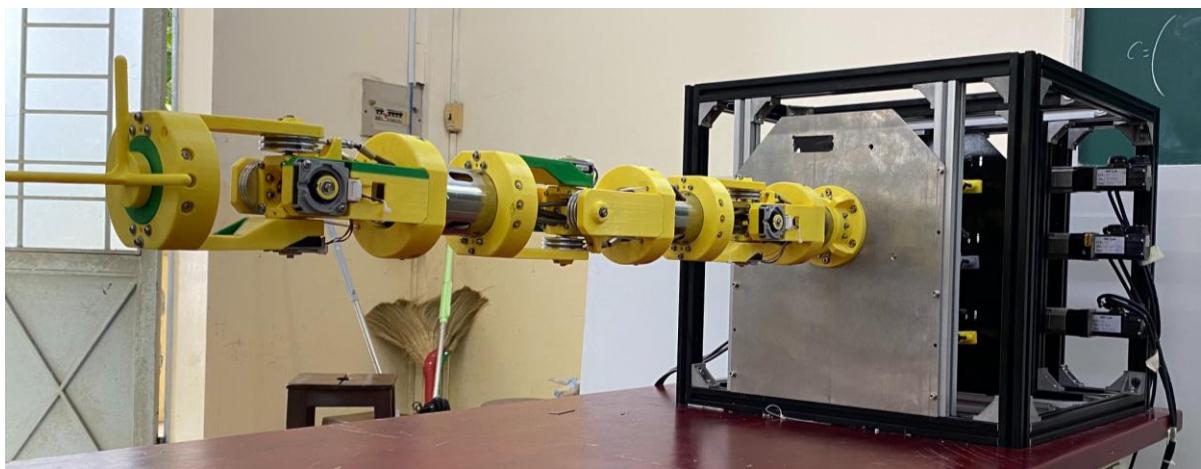
Các chi tiết 3, 4, 5 và 6 là các trục inox có đường kính 6mm, các trục này kết hợp với các chi tiết 1 và 2 để tạo nên một khối khớp vạn năng, cho phép khớp này có thể xoay theo 2 trục vuông góc với nhau. Chi tiết 7 là pulley được thiết kế để phù hợp với việc dẫn động bằng cáp, pulley này được cố định với chi tiết 2, đảm nhận nhiệm vụ kéo khớp của robot có thể xoay quanh trục Y. Thiết kế các pulley này được mô tả trong Hình 3.17.



Hình 3.17: Mô hình 3D pulley trên thân robot a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn từ trên xuống

3.2.2 Thi công mô hình robot

Dựa vào bản thiết kế robot trình bày ở phần trên, sử dụng các phương pháp gia công như in 3D, CNC, nhóm tiến hành gia công phần để robot, phần thân robot và sau cùng là lắp ghép hoàn thiện mô hình robot cáp 6 bậc tự do.



Hình 3.18: Tổng quan mô hình robot thi công

3.2.2.1 *Thi công đé robot*

Đé robot sử dụng 6 động tương ứng với 6 bậc tự do của robot. Khớp 1, 2, 3 dùng động cơ AC Servo 400W và khớp 2, 4, 6 dùng động cơ AC Servo 100W, kết hợp với dây cáp và pulley để truyền động.

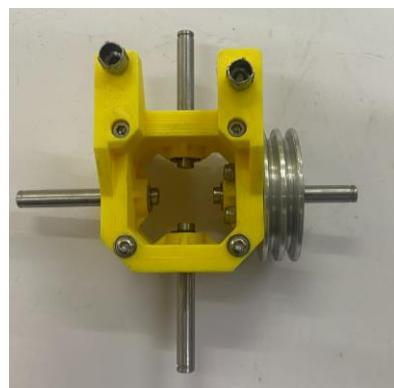


Hình 3.19: Thi công đé robot

3.2.2.2 *Thi công thân robot*



Hình 3.20: Thi công khâu của robot



Hình 3.21: Thi công khớp của robot



Hình 3.22: Thi công thân robot

3.3 Thiết kế và thi công module CAN

3.3.1 Yêu cầu thiết kế cho module CAN

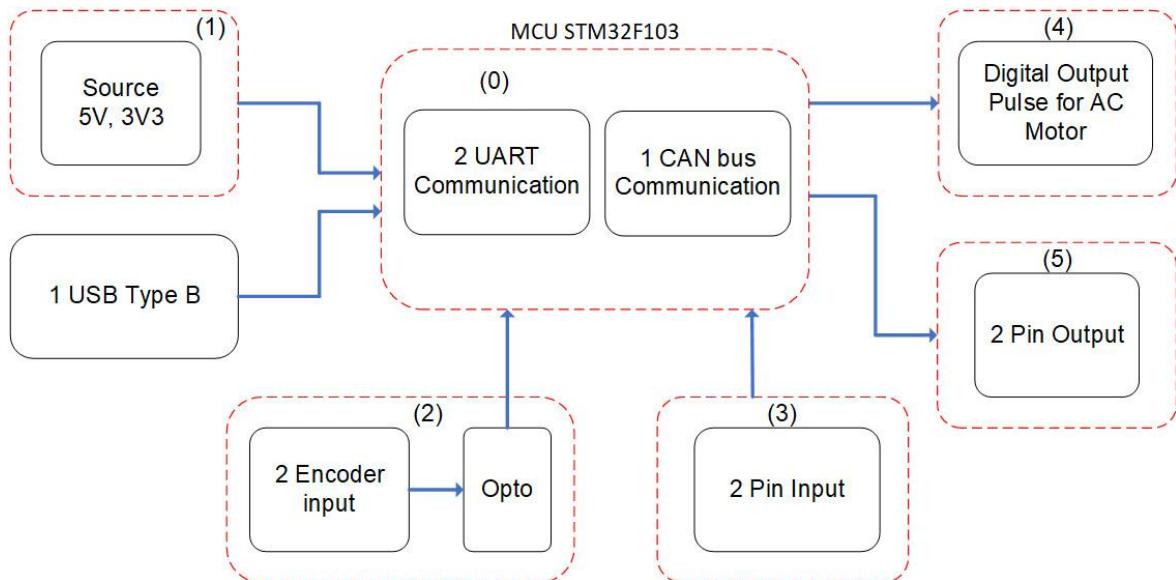
Mỗi module CAN có nhiệm vụ điều khiển và giám sát 1 khớp xoay của robot, vì vậy mỗi module cần có những chức năng sau:

Bảng 3.1: Yêu cầu thiết kế module CAN

STT	Yêu cầu	Thiết kế
1	Mạch điều khiển được đặt trong tủ điện AC, nhiều gây ra làm tín hiệu encoder đọc từ động cơ bị sai lệch, vì vậy module CAN cần phải có khả năng triệt tiêu nhiễu AC	Mạch lọc thông thấp đọc encoder từ AC Servo
2	Đối với encoder trên động cơ AC, dòng điện lớn dễ làm hư hỏng mạch điều khiển khi kết nối trực tiếp, vì vậy module CAN cần phải cách ly với mạch động lực	Mạch cách ly AC - DC
3	Có khả xuất xung điều khiển động cơ AC Servo	Sử dụng vi điều khiển để tạo xung
4	Có khả năng truyền thông bằng mạng CAN	Sử dụng module giao tiếp CAN

Bên cạnh đó, module CAN còn có một số chức năng khác như đọc tín hiệu tương tự, giao tiếp UART, giao tiếp SPI...

3.3.2 Sơ đồ khối cho module CAN



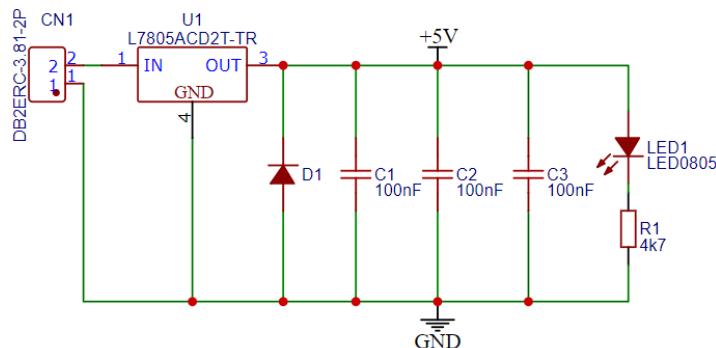
Hình 3.23: Sơ đồ khối các thành phần trong module CAN

Dựa vào yêu cầu thiết kế, sơ đồ khối các thành phần của một node CAN được mô tả trong Hình 3.23 và được trình bày cụ thể như sau:

- Khối nguồn: cung cấp nguồn 5V và 3V cho mạch
- Khối nguồn USB giao tiếp: cổng USB giao tiếp nạp code và Debug
- Khối đọc Encoder: kênh đọc encoder
- Khối xử lý trung tâm: vi điều khiển
- Khối cấp xung cho AC Motor: kênh cấp xung cho động cơ AC
- Khối pin Input-Output: chân Input và Output

3.3.3 Sơ đồ nguyên lý cho module CAN

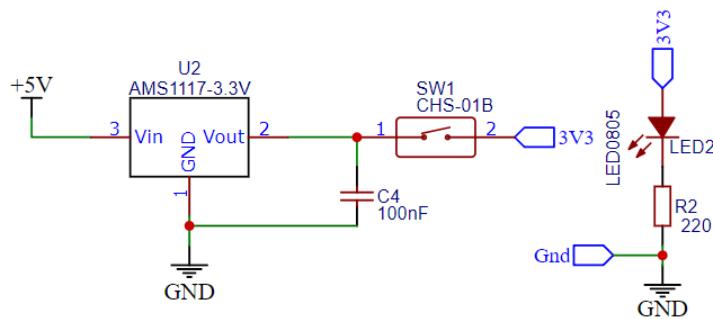
Dựa vào yêu cầu thiết kế và sơ đồ khối các thành phần của 1 node CAN, ta sẽ thiết kế từng khối trong 1 node CAN và sau cùng là bố trí và nối dây cho mạch PCB.



Hình 3.24: Khối nguồn 5VDC trong một node CAN

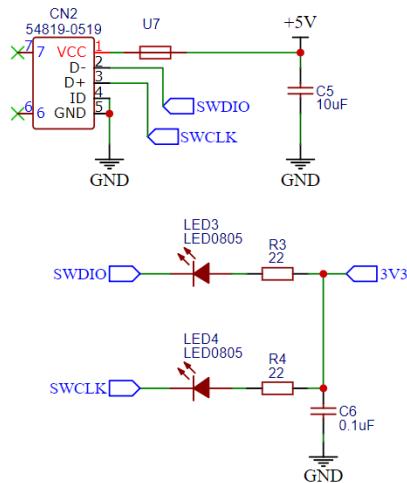
Khối nguồn sử dụng IC7805 để ổn định điện áp ngõ vào cung cấp cho mạch, tụ điện được dùng để lọc phồng cho nguồn và có đèn led báo nguồn. Điện áp cung cấp ngõ vào từ 7-36 VDC.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



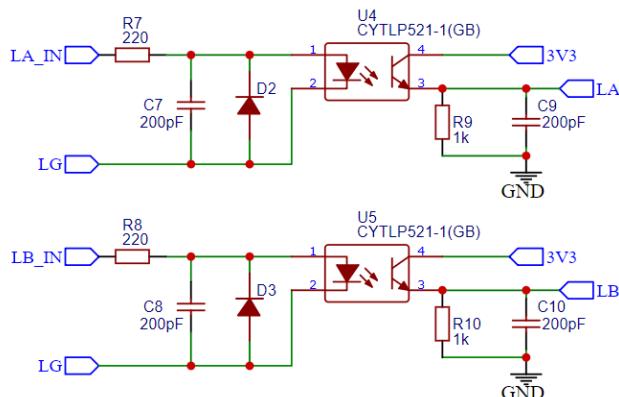
Hình 3.25: Khối nguồn 3.3VDC trong một node CAN

Trong mạch điện có các linh kiện có sử dụng nguồn 3V3 nên dùng IC AMS1117-3V3 để hạ áp, tương tự như mạch nguồn 5VDC. Nguồn có thêm tụ để lọc phẳng, ngoài ra còn có switch bật tắt nguồn và có đèn báo.



Hình 3.26: Cổng nạp chương trình trên một node CAN

Mạch sẽ giao tiếp nạp Code và Debug với vi xử lý STM32 thông qua 2 chân tín hiệu là SWDIO và SWCLK. Cầu chì U7 tránh bị quá tải nguồn USB và nguồn của mạch PCB.

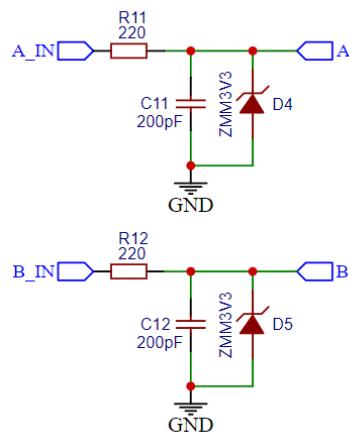


Hình 3.27: Bộ lọc thông thấp đọc encoder từ AC Servo trong một node CAN

Vì dòng điện của động cơ AC lớn hơn dòng điện của vi điều khiển, việc nối trực tiếp mà không sử dụng bộ cách ly sẽ gây trở kháng và có thể gây hỏng hóc cho vi điều khiển. Do đó cần bộ cách ly giữa động cơ và mạch. Mạch đọc encoder AC sử dụng opto

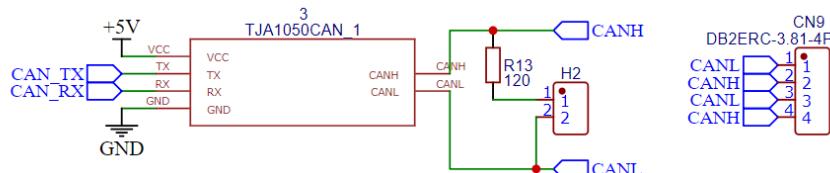
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

TLP521 với thời gian lên xuống của tín hiệu là 5us – 200kHz. Bên cạnh đó còn có nhiều nên sử dụng thêm bộ lọc thông thấp tại ngõ vào của opto giúp tín hiệu ổn định hơn.



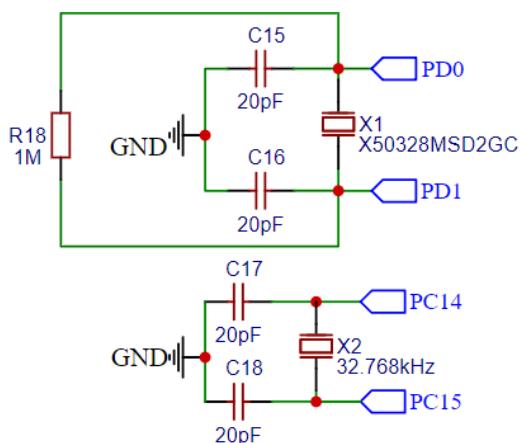
Hình 3.28: Mạch đọc encoder gắn trên link trong một node CAN

Kênh encoder còn lại sử dụng nguồn 5VDC nên sử dụng mạch lọc thông thấp để ổn định tín hiệu, diode Zener sử dụng để xén tín hiệu còn 3.3VDC để phù hợp với ngõ vào tín hiệu số của vi điều khiển STM.



Hình 3.29: Module giao tiếp CAN TJA trong một node CAN

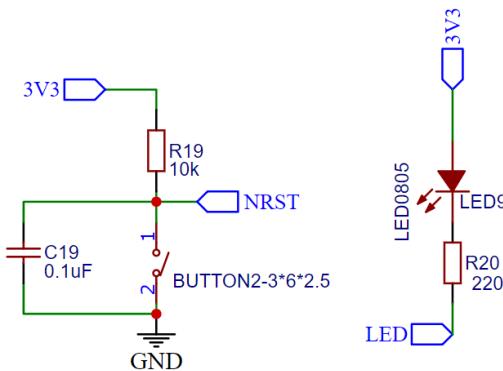
Sử dụng module TJA1050 hỗ trợ cho STM giao tiếp thông qua CAN bus.



Hình 3.30: Mạch tạo dao động cho vi xử lý

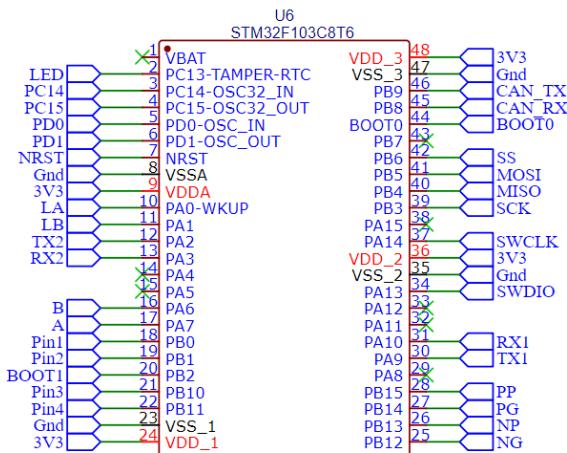
Sử dụng thạch anh có tần số dao động là 32.768kHz để tạo dao động ngoài.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



Hình 3.31: Nút nhấn reset

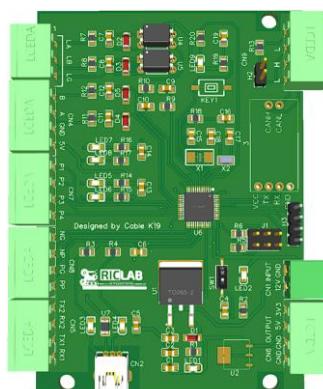
Nút nhấn reset kết nối với đèn báo trạng thái nút nhấn và tụ chống dội.



Hình 3.32: Sơ đồ chân sử dụng trên MCU STM32F103C8T6

Mỗi node CAN được trang bị một vi điều khiển STM32F103C8T6 làm bộ xử lý trung tâm.

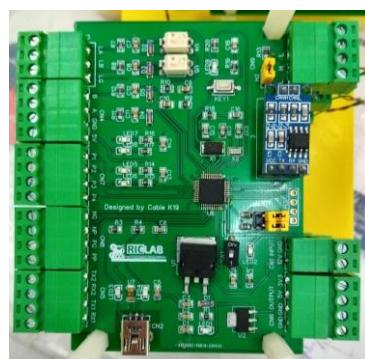
Sau khi thiết kế mạch nguyên lý, bố trí linh kiện và nối dây các linh kiện, ta có mô hình 3D của module 1 node CAN như hình bên dưới:



Hình 3.33: Mô hình 3D của một node CAN

3.3.4 Thi công module CAN

Kết quả thi công module CAN:

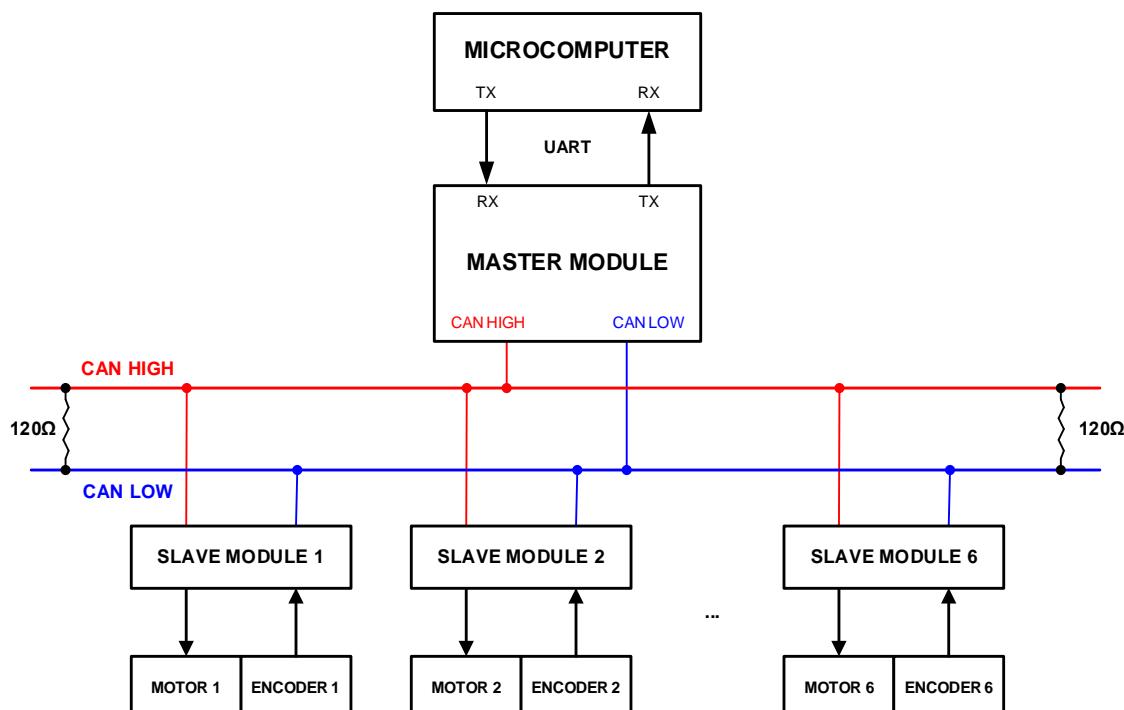


Hình 3.34: Thi công module CAN

3.4 Thiết kế và thi công mạng CAN cho robot cáp 6 bậc tự do

3.4.1 Thiết kế mạng CAN cho robot cáp 6 bậc tự do

Hệ thống mạng CAN bao gồm 1 master và 6 slave module như Hình 3.35.



Hình 3.35: Sơ đồ tổng quan hệ thống mạng CAN

Tín hiệu sau khi tính toán từ microcomputer sẽ được gửi xuống cho master, sau đó master sẽ phân chia các gói tin nhắn thông qua mạng CAN, tin nhắn gồm dữ liệu để slave tạo xung chuyển động cho động cơ hoạt động. Cùng với đó slave sẽ đọc tín hiệu encoder từ động cơ AC và encoder trên link của robot sau đó gửi về cho master và cuối cùng gửi về cho microcomputer.

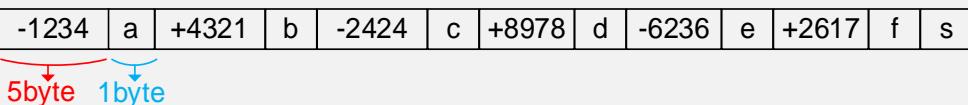
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

3.4.1.1 Lưu đồ giải thuật cho master module

Tin nhắn từ microcomputer cho master có cấu trúc như Hình 3.36.

Cấu trúc tin nhắn microcomputer gửi cho master:

-1234a+4321b-2424c+8978d-6236e+2617fs

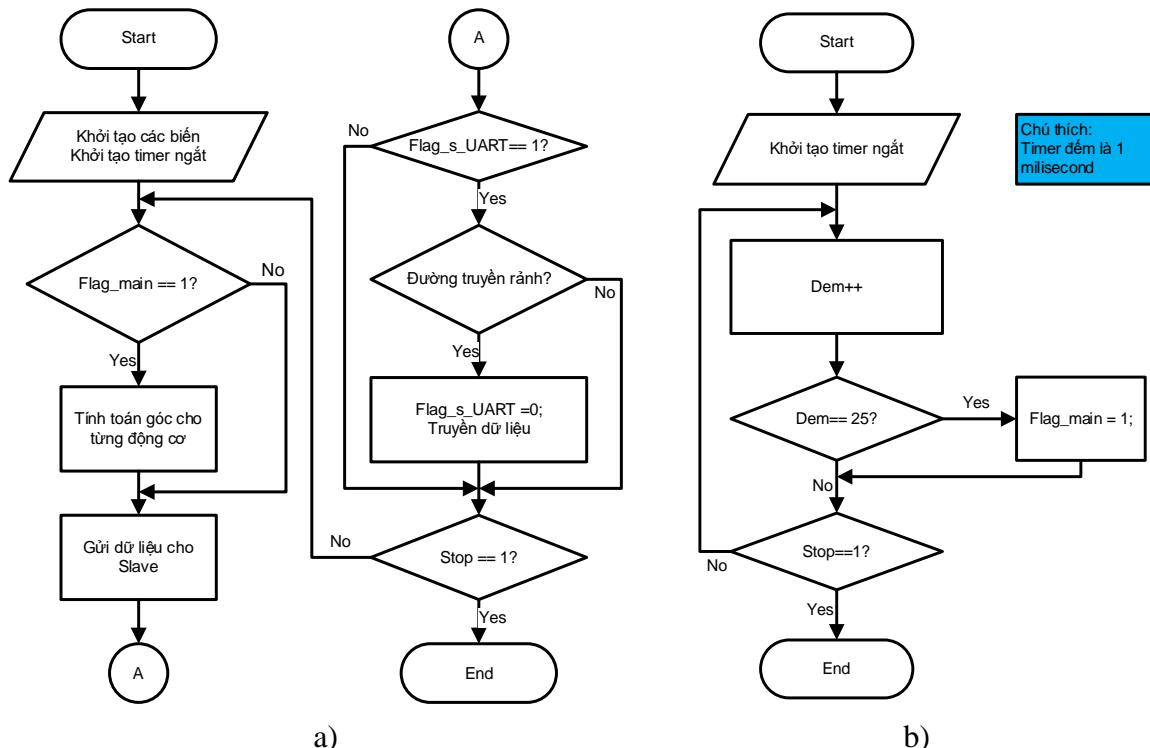


Hình 3.36: Cấu trúc tin nhắn từ microcomputer cho master

Tín hiệu gửi xuống cho master là vị trí góc tại mỗi link, trong đó gồm có 6 byte, 5 byte đầu tiên là giá trị vị trí góc khi đã nhân lên 100 lần, vị trí góc thực tế sẽ là $-1234 / 100 = -12.34$ deg, 1 byte cuối cùng sẽ là tên của động cơ.

Bảng 3.2: Một số ký hiệu tên động cơ sử dụng trong tin nhắn

Mô tả	Kí hiệu
Động cơ link 1	a
Động cơ link 2	b
Động cơ link 3	c
Động cơ link 4	d
Động cơ link 5	e
Động cơ link 6	f

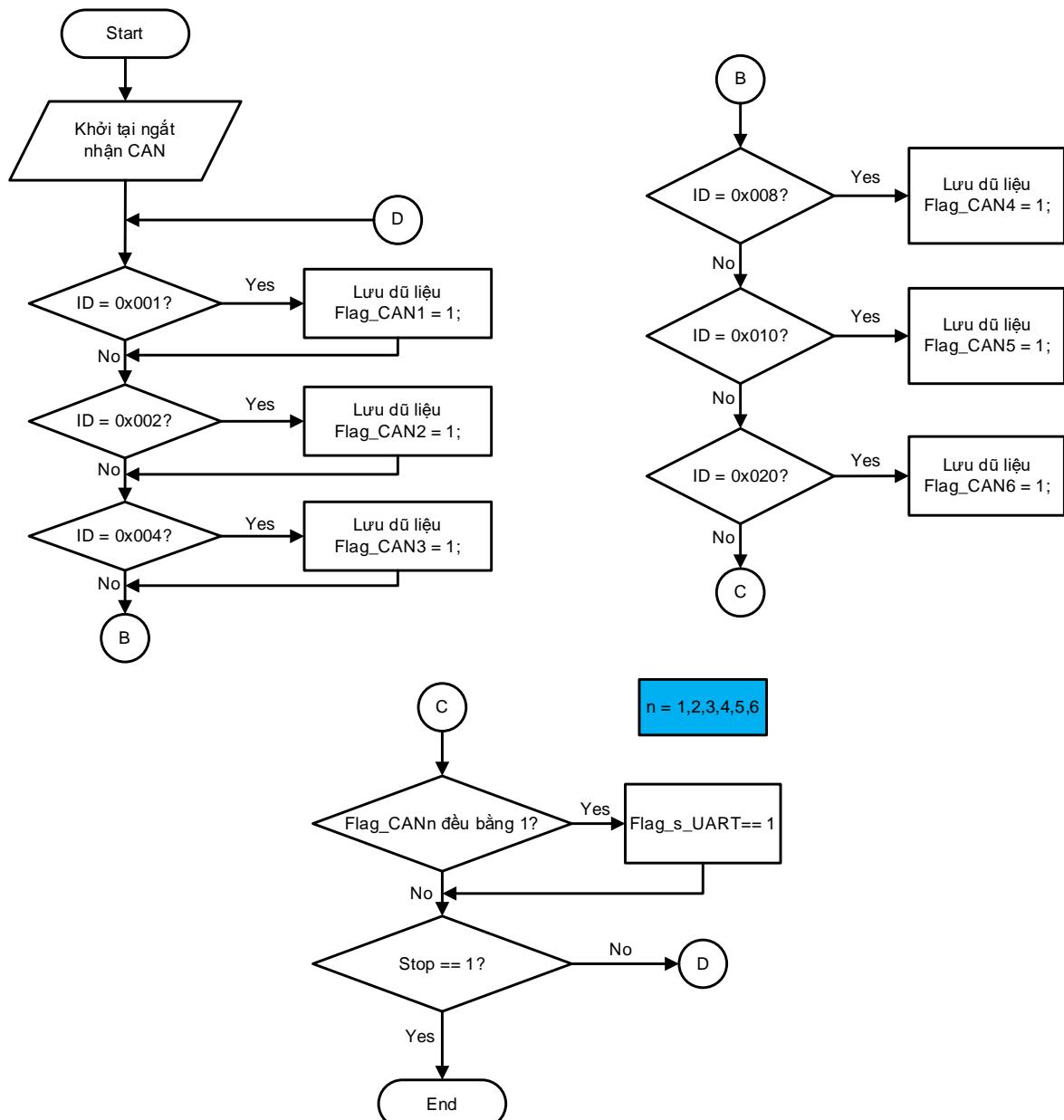


Hình 3.37: Lưu đồ giải thuật trên vi điều khiển master module a) chương trình chính; b) chương trình ngắt timer

Khi bắt đầu, hệ thống khởi tạo các biến cho chương trình và khởi tạo timer ngắn. Khi timer xảy ra ngắt báo cờ lên '1', trong vòng lặp While kiểm tra cờ timer đã lên 1 hay

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

chưa? Nếu giá trị là 1, tiến hành thực hiện các công việc “Tính toán xung cho Driver”, “Đọc 2 encoder”, “Tính toán góc” và gửi tín hiệu trở về.

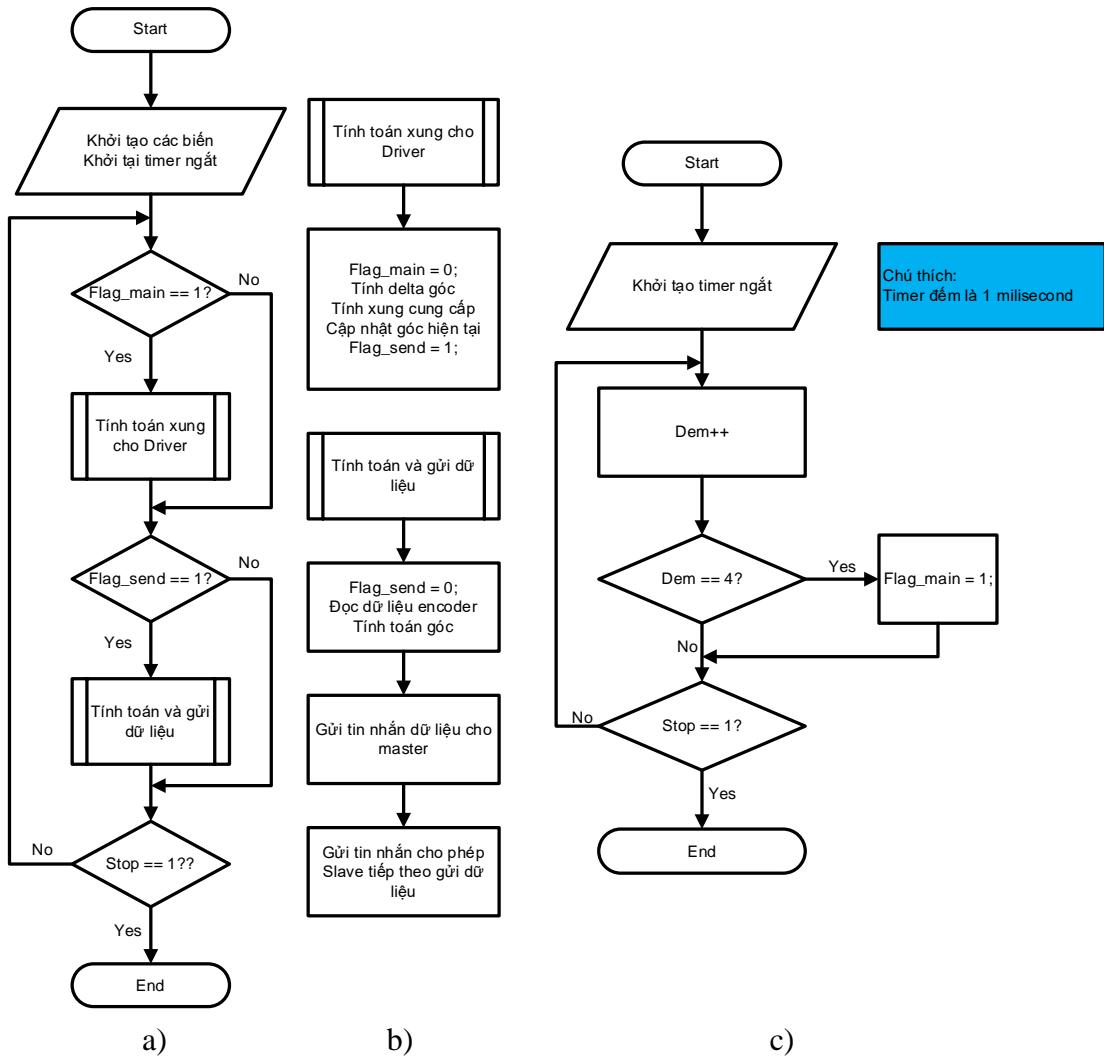


Hình 3.38: Lưu đồ chương trình ngắt nhận CAN trên vi điều khiển master

Chương trình ngắt nhận dữ liệu trên Master: khi có tin nhắn gửi đến Master từ Slave, công việc đầu tiên cần kiểm tra ID để biết được Slave từ Node nào đã gửi dữ liệu sau đó lưu lại để cho quá trình xử lý và báo cờ. Nếu tất cả cờ báo nhận dữ liệu đã lên mức “1” nghĩa là dữ liệu đầy đủ và có thể xử lý để gửi lên máy tính thông qua UART.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

3.4.1.2 Lưu đồ giải thuật cho Slave modules

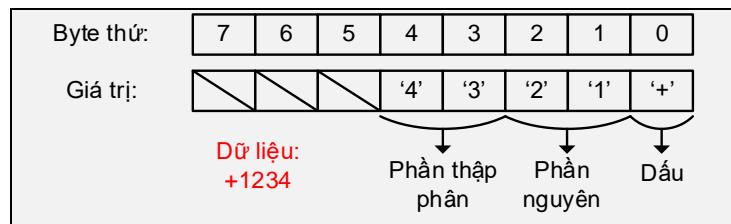


Hình 3.39: Lưu đồ giải thuật trên vi điều khiển slave module a) chương trình chính; b) chương trình con “Tính toán xung cho driver” và “Tính toán và gửi dữ liệu”; c) chương trình timer định thời

Mô tả chương trình timer ngắn: timer được định thời ngắn là 1ms, cứ mỗi 1ms biến “Dem” sẽ được cộng thêm 1 lần. Khi biến “Dem” là 4, nghĩa là 4ms sẽ báo cờ để thực hiện công việc của chương trình.

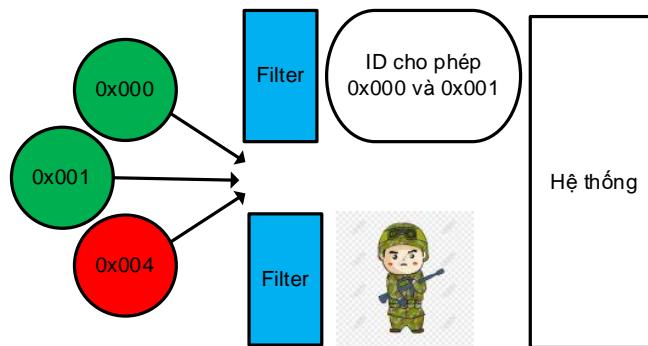
Mô tả chương trình while: khi có cờ báo, công việc sẽ được thực hiện theo lưu đồ Hình 3.39, tính toán xung cung cấp cho driver khi có tín hiệu đặt, dựa vào sự thay đổi về tín hiệu đặt, ta quy đổi ra xung để cấp cho driver chuyển động đến vị trí mong muốn và cập nhật vị trí góc mới cho chương trình. Sau khi thực hiện xong mới cho phép gửi dữ liệu đi. Chương trình con gửi dữ liệu sẽ tính toán giá trị góc từ xung encoder đọc được và gửi về master, cùng với đó gửi đi tin nhắn với mã ID khác yêu cầu node tiếp theo truyền dữ liệu. Cấu trúc tin nhắn truyền nhận giữa master và slave như sau:

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



Hình 3.40: Tin nhắn master và slave trao đổi với nhau

Cấu hình Filter ID và Filter Mask để lọc tin nhắn: do trong hệ thống mạng CAN có nhiều tin nhắn được truyền đi giữa các node, do đó cần cấu hình bộ lọc cho từng node để loại bỏ đi những tin nhắn không cần thiết tránh hiện tượng nhận quá nhiều tin nhắn cùng lúc làm treo hệ thống.



Hình 3.41: Hình ảnh mô tả bộ lọc tin nhắn

Một ví dụ mô tả đơn giản như sau:

Bảng 3.3: Ví dụ đơn giản về bộ lọc tin nhắn

STT bit	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
ID tin nhắn truyền đến	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Filter ID	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Filter Mask	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Mô tả: tin nhắn khi mạng CAN truyền nhận với nhau sẽ đi qua bộ lọc trước khi đi vào hệ thống nhận dữ liệu. Bộ lọc sẽ kết hợp so sánh ID của tin nhắn truyền đến với ID và Mask để ra quyết định tin nhắn đó có được phép đi vào hay không. Bit có giá trị “0” trên Filter Mask nghĩa là không quan tâm, bit có giá trị “1” trên Filter Mask là quan tâm.

Dựa vào Bảng 3.3, bit thứ 1 đến bit thứ 10 đều có giá trị là 1, nghĩa là tin nhắn truyền đến phải có ID với bit thứ 1 đến bit thứ 10 phải bằng 0, chỉ cần 1 bit khác sẽ không thỏa điều kiện. Bit thứ 0 trên Filter Mask có giá trị là 0 có nghĩa là tại vị trí bit thứ 0 trên Filter ID có thể là 0 hoặc 1 đều được. Vậy cuối cùng với cấu hình bộ lọc như trên, tin nhắn sẽ được nhận có mã như sau: 0x000 0000 0000, 0x000 0000 0001.

Bộ lọc được sử dụng bao gồm 11 bit, cấu hình bộ lọc theo bảng sau:

Bảng 3.4: Bảng cấu hình Filter ID và Filter Mask

Byte	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	ID	Mask
Node 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0x001	0xffe
Node 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0x002	0ffd

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

Node 3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0x004	0xffb
Node 4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0x008	0xff7
Node 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0x010	0xef
Node 6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0x020	0fdf

Node 1 sẽ nhận được hai tin nhắn là: 0x000 và 0x001.

Node 2 sẽ nhận được hai tin nhắn là: 0x000 và 0x002.

Node 3 sẽ nhận được hai tin nhắn là: 0x000 và 0x004.

Node 4 sẽ nhận được hai tin nhắn là: 0x000 và 0x008.

Node 5 sẽ nhận được hai tin nhắn là: 0x000 và 0x010.

Node 6 sẽ nhận được hai tin nhắn là: 0x000 và 0x020.

3.4.2 Thi công mạng CAN cho robot cáp 6 bậc tự do

Dựa vào kết quả thi công module CAN và sơ đồ kết nối mạng CAN trong Hình 3.35 ta có kết quả thi công mạng CAN:



Hình 3.42: Thi công mạng CAN 6 node

3.5 Thiết kế và thi công tủ điện

Tủ điện được thiết kế đảm bảo các tiêu chí sau: thiết kế gọn nhẹ, tính thẩm mỹ cao, dễ vận hành, kiểm tra và thay thế. Tủ điện bao gồm các thành phần chính sau: 3 driver MR-JE 40A dùng để điều khiển động cơ AC Servo HG-KN43B có công suất 400W, 3 driver MR-J3 10A dùng để điều khiển động cơ AC Servo có công suất 100W (HF-KP13, HG-KR13, HF-MP13), mạng truyền thông CAN, các đèn báo và nút nhấn.

3.5.1 Danh sách thiết bị của tủ điện

Căn cứ vào yêu cầu thiết kế tủ điện bên trên, danh sách các thiết bị được lựa chọn để thiết kế tủ điện được trình bày trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5: Danh sách thiết bị tủ điện

STT	Tên	Hình ảnh	SL	Đặc điểm
1	CP		1	3 pha Điện áp định mức 220VAC Dòng định mức 50A Bảo vệ quá tải và ngắn mạch

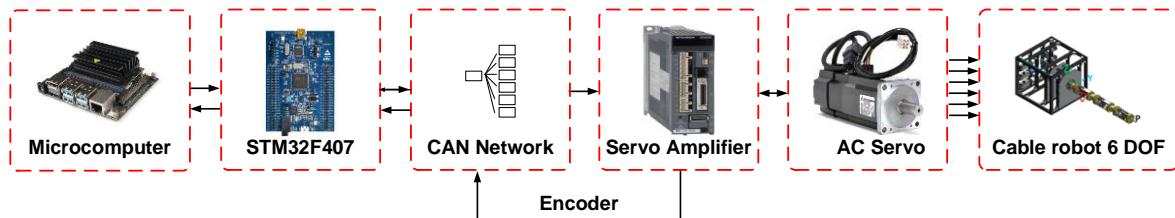
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

2	CP1		2	3 pha Điện áp định mức 220VAC Dòng định mức 15A Dùng để bảo vệ
3	CP4 và CP5		2	1 pha Điện áp định mức 250VAC Dòng định mức 10A
4	CP6 và CP7		2	1 pha Điện áp định mức 250VAC Dòng định mức 5A Dùng để bảo vệ mạch
5	Contactor K1 và K2		2	3 pha Điện áp định mức 690VAC Dòng điện mức 25A Áp cuộc coil 24VDC Dùng để đóng/cắt mạch điều khiển và mạch công suất cho driver
6	Nguồn		1	Điện áp ngõ vào 220VAC Điện áp ngõ ra 24VDC Dòng ngõ ra 5A
7	Lọc		2	Điện áp định mức: 250VAC Dòng định mức: 20A Lọc nguồn cấp cho driver
8	MR-JE 40A		3	1 pha hoặc 3 pha Điện áp vào 200 – 240 VAC Điện áp ra 3 pha 170VAC Tần số 50 – 60 Hz, công suất 400W Dòng điện định mức 2.6A
9	MR-J3 10A		3	1 pha hoặc 3 pha Điện áp vào 220 – 230VAC Điện áp ra 3 pha 170VAC Tần số 50 – 60 Hz, công suất 100W Dòng điện định mức 0.9A

3.5.2 Sơ đồ nối dây hệ thống

3.5.2.1 Sơ đồ đi dây tổng quát

Sau khi đã lựa chọn thiết bị cần thiết cho hệ thống, sơ đồ kết nối tổng quát của hệ thống được biểu thị như Hình 3.43:

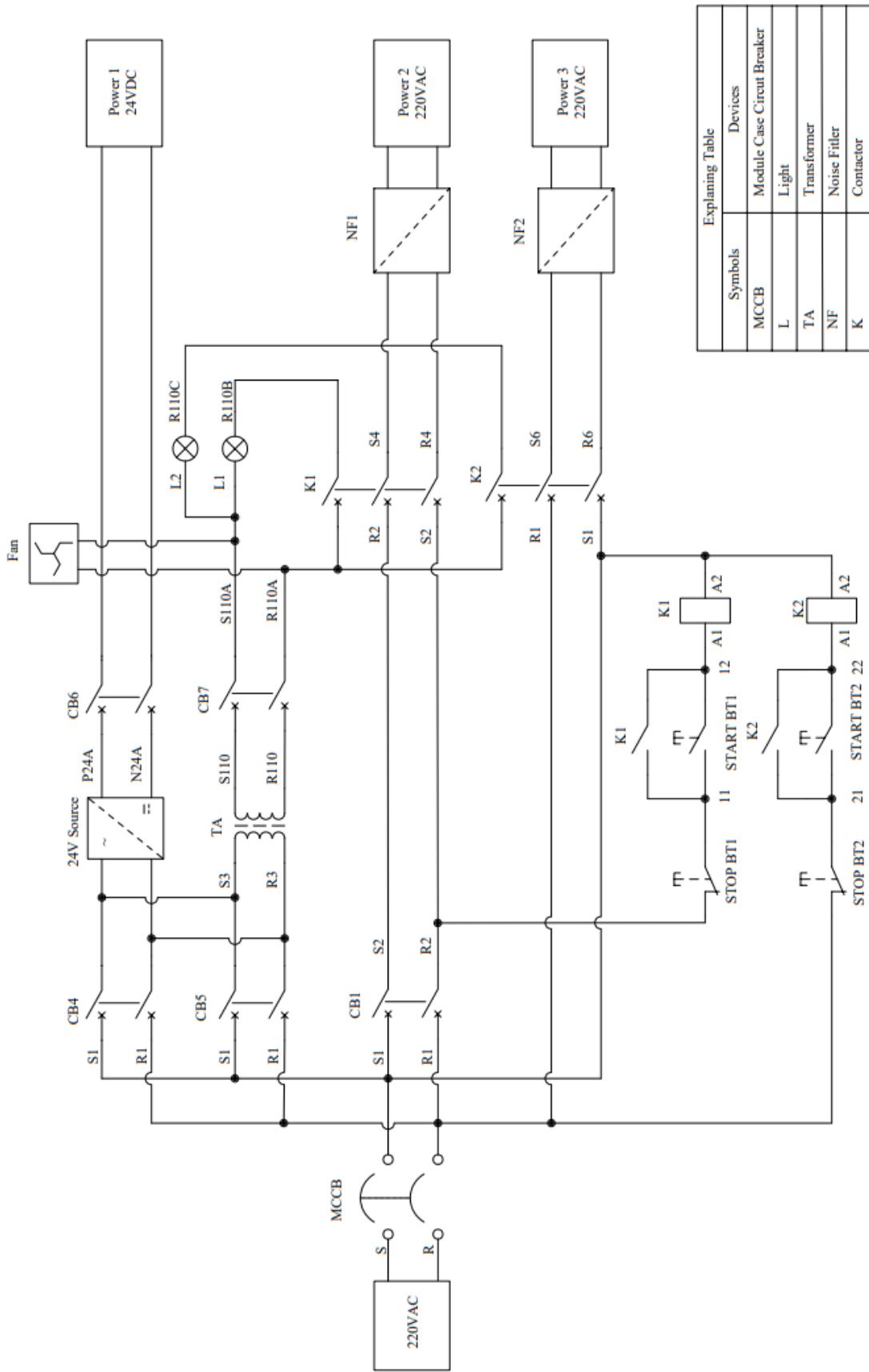


Hình 3.43: Sơ đồ đi dây tổng quát các khối của hệ thống ở Slave

Tổng quan hệ thống bao gồm khái niệm máy tính nhúng có nhiệm vụ nhận và gửi dữ liệu truyền không dây từ Zigbee. Sau đó tiến hành xử lý dữ liệu đã được nhận, tính toán động học thông minh bằng phương pháp Jacobian. Tiếp đến máy tính nhúng gửi dữ liệu xuống STM32F407 (1 Node CAN) để truyền dữ liệu cho các Node CAN khác. Các node CAN có nhiệm vụ nhận dữ liệu rồi bắt đầu điều khiển khái niệm Driver Servo. Mỗi Node CAN có nhiệm vụ đọc Encoder ở từng động cơ để đánh giá sự chính xác của quá trình điều khiển. Sau cùng dữ liệu ở các Node CAN sẽ được truyền lên cho STM32F407 rồi truyền lên cho máy tính nhúng để quan sát và thu thập dữ liệu.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

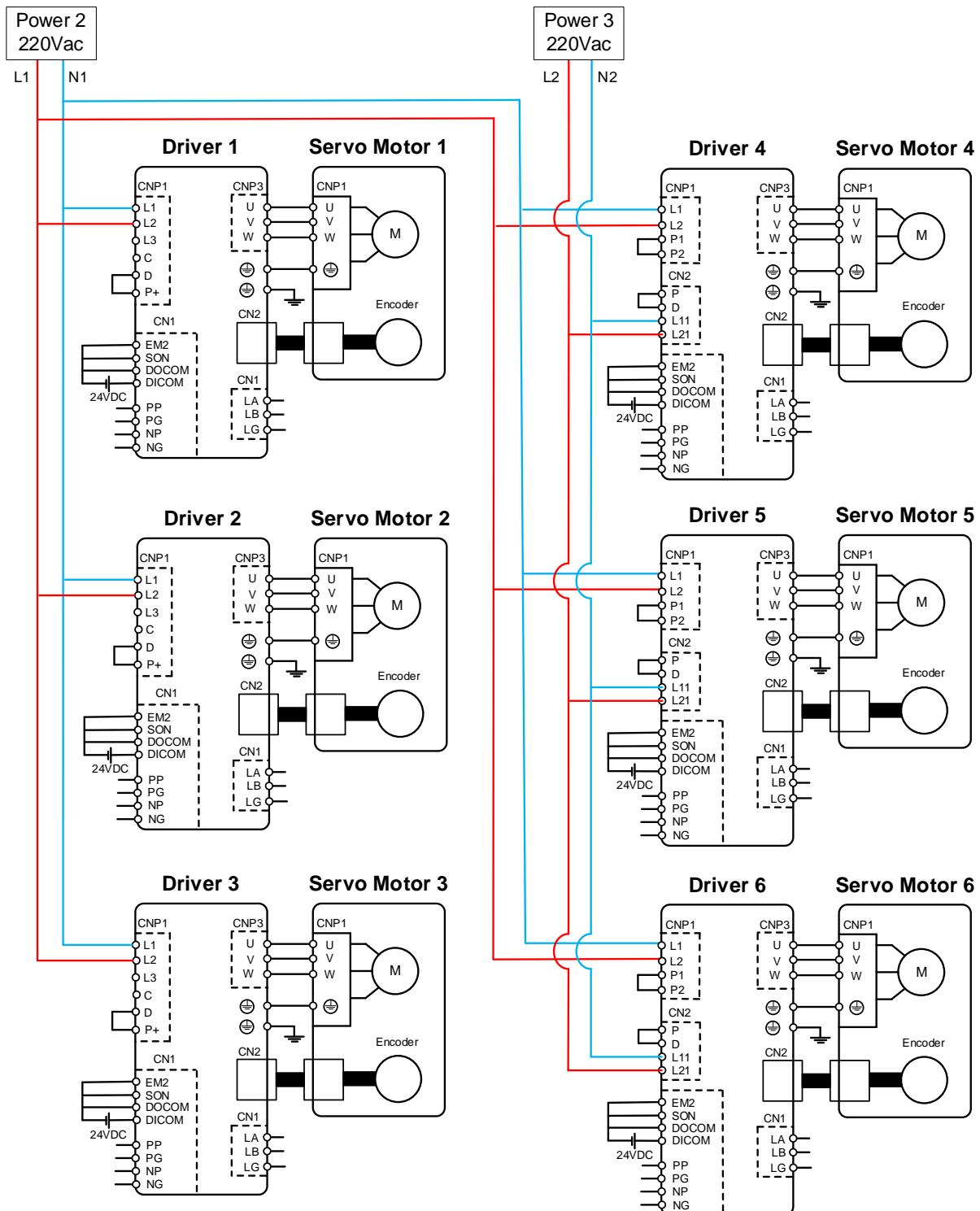
3.5.2.2 Sơ đồ nối dây tủ điện



Hình 3.44: Sơ đồ nối dây tủ điện

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

Mạch động lực của hệ thống bao gồm 6 động cơ AC Servo và 6 driver điều khiển động cơ AC Sero. Sơ đồ đi dây của mạch động lực được trình bày trong Hình 3.45.

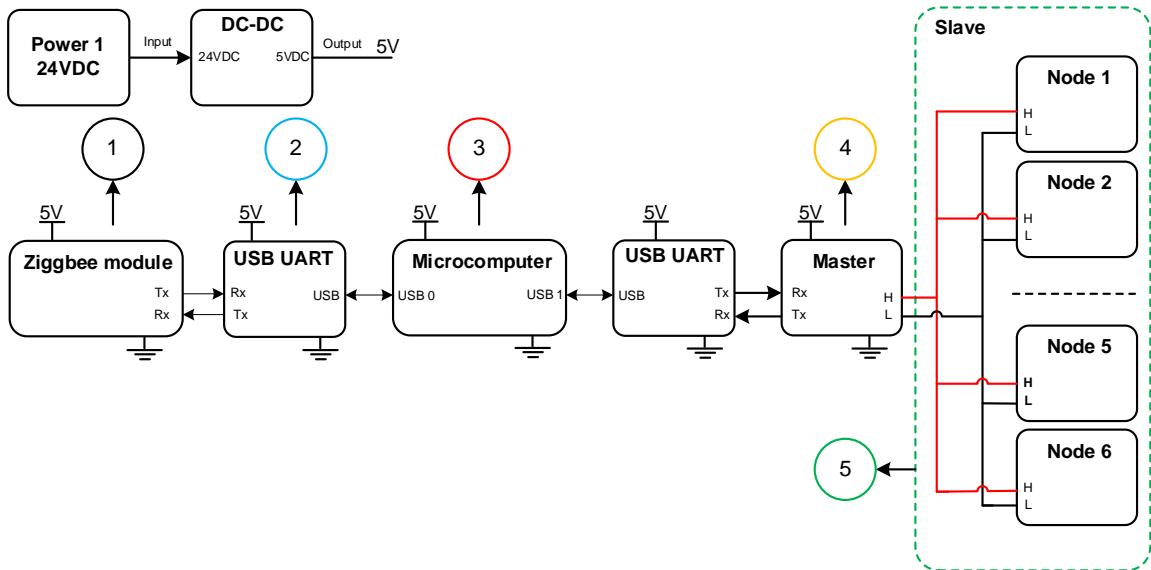


Hình 3.45: Sơ đồ đi dây mạch động lực

3.5.2.3 Sơ đồ nối dây mạch điều khiển

Mạch điều khiển của hệ thống cung cấp nguồn điện cho mạng CAN (bao gồm 1 master và 6 slave module). Sơ đồ đi dây mạch điều khiển được trình bày trong Hình 3.46.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG

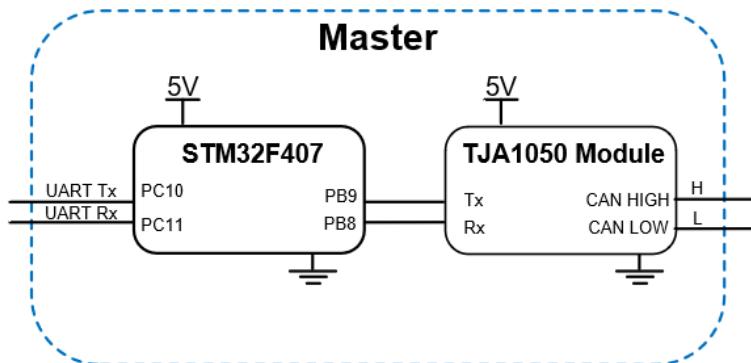


Hình 3.46: Sơ đồ đi dây mạch điều khiển

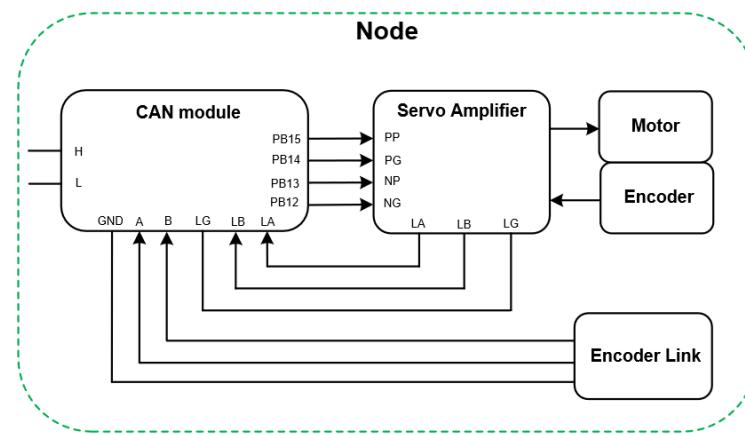
Các khối trong sơ đồ nối dây mạch điều khiển tổng quát:

- Khối 1 Ziggbee module có chức năng truyền tín hiệu nối tiếp UART thông qua giao thức không dây
- Khối 2 USB UART có chức năng chuyển đổi tín hiệu UART sang RS-232 và ngược lại
- Khối 3 Microcomputer là một máy tính nhúng tính thu thập dữ liệu và xử lý thuật toán
- Khối 4 Master: truyền nhận dữ liệu từ khối Microcomputer và tách dữ liệu điều khiển cho các Slave hoạt động
- Khối 5 Slave: khối bao gồm 6 Node để điều khiển 6 động cơ AC Servo và đọc tín hiệu encoder

Sơ đồ nối dây cho Master được thể hiện như hình Hình 3.47, sơ đồ nối dây của 1 node trong Slave như Hình 3.48:

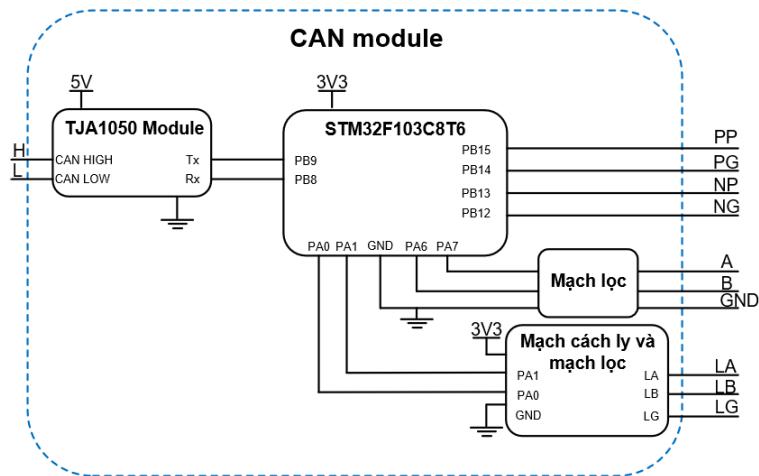


Hình 3.47: Sơ đồ nối dây Master



Hình 3.48: Sơ đồ nối dây 1 Node của Slave

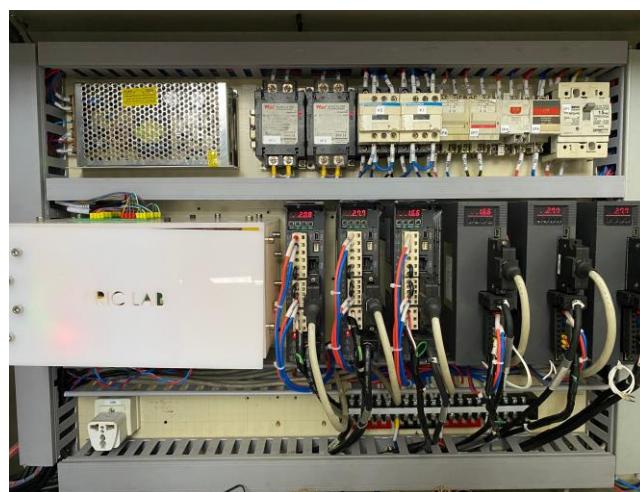
Trong đó khối CAN module có sơ đồ đi dây như Hình 3.49:



Hình 3.49: Sơ đồ nối dây khối CAN module

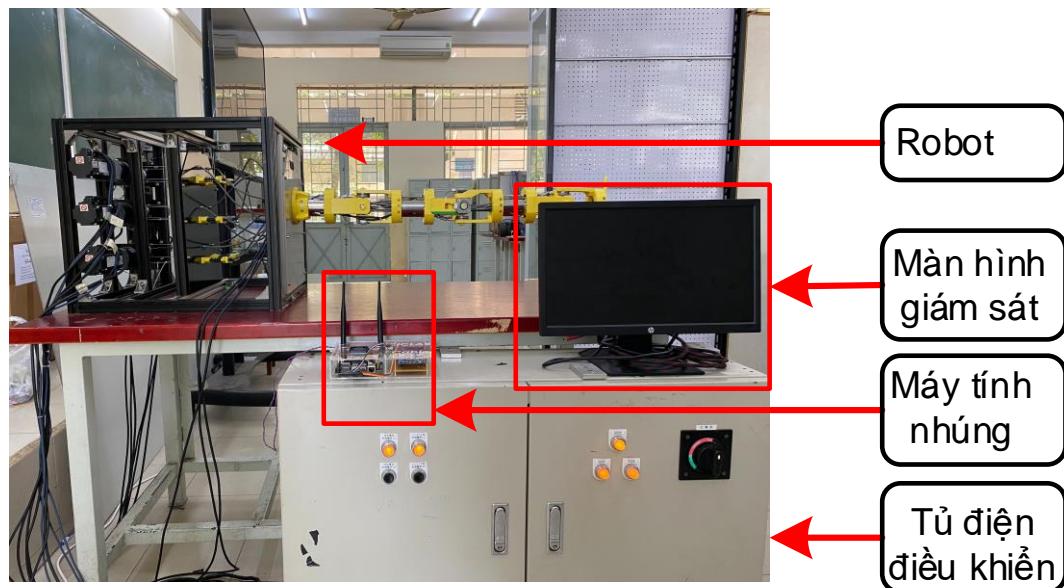
3.5.2.4 Kết quả đi dây tủ điện điều khiển

Kết quả sau khi đi dây tủ điện điều khiển:



Hình 3.50: Kết quả đi dây tủ điện điều khiển

Hình ảnh hệ thống slave sau khi lắp đặt hoàn thiện được mô tả như hình sau:



Hình 3.51: Hệ thống sau khi đi dây hoàn thiện

3.6 Xây dựng giao diện quan sát và thu thập dữ liệu

Yêu cầu thiết kế giao diện điều khiển và tính toán giải thuật:

- Giao diện đơn giản
- Giao diện cần hiển thị được đầy đủ các thông số của robot: vị trí end effector, các góc khớp theta, thời gian khi chạy giao diện
- Giao diện có thể lưu dữ liệu dưới dạng file excel
- Giao diện có thể kết nối hai USB UART cùng một lúc
- Giao diện có thể kiểm tra tín hiệu encoder từ động cơ và từ encoder ngoài
- Giao diện có thể quy hoạch quỹ đạo theo các hình cơ bản
- Giao diện có thể hiện thị được thông tin về vị trí, đáp ứng góc và sai số ở chế độ điều khiển từ xa

Phần mềm lập trình giao diện điều khiển và thu thập dữ liệu. Do phần cứng sử dụng máy tính nhúng Jetson nano để lập trình các thuật toán và thu thập dữ liệu của hệ thống, phần mềm nhóm đã sử dụng là QT Creator.

Một số đặc điểm của phần mềm QT Creator: phần mềm được hỗ trợ trên nhiều nền tảng khác nhau như window, macbook, linux... có thể thiết kế giao diện cho các ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Ngôn ngữ lập trình đa dạng C/C++, python, java... và cộng đồng học tập lớn.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



Hình 3.52: Phần mềm QT Creator

Giao diện điều khiển bao gồm 6 trang chính, mỗi trang sẽ có một chức năng riêng và được mô tả trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6: Mô tả các trang trong giao diện quan sát và thu thập dữ liệu

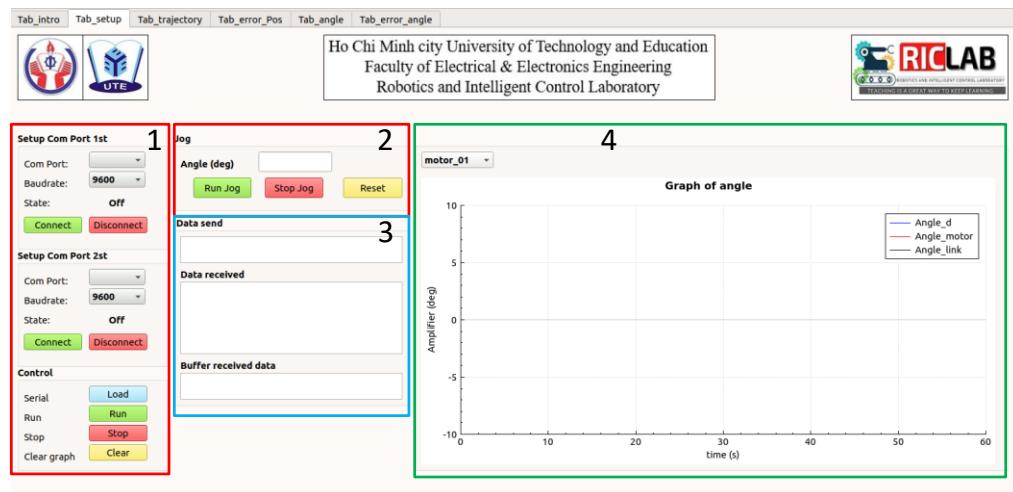
STT	Tên trang	Mô tả
1	Tab_intro	Giới thiệu tên đề tài và các thành viên
2	Tab_setup	Thiết lập một số tính năng để chạy mô hình robot
3	Tab_trajectory	Chọn chế độ quy hoạch quỹ đạo cho robot, hiển thị vị trí và lưu dữ liệu
4	Tab_error_Pos	Hiển thị sai số vị trí của end – effector
5	Tab_angle	Hiển thị dữ liệu các góc khớp của robot
6	Tab_error_angle	Hiển thị dữ liệu sai số góc khớp của robot



Hình 3.53: Tab_intro

Tab_intro là trang giới thiệu tên đề tài, giới thiệu giáo viên hướng dẫn và các thành viên trong nhóm thực hiện đề tài.

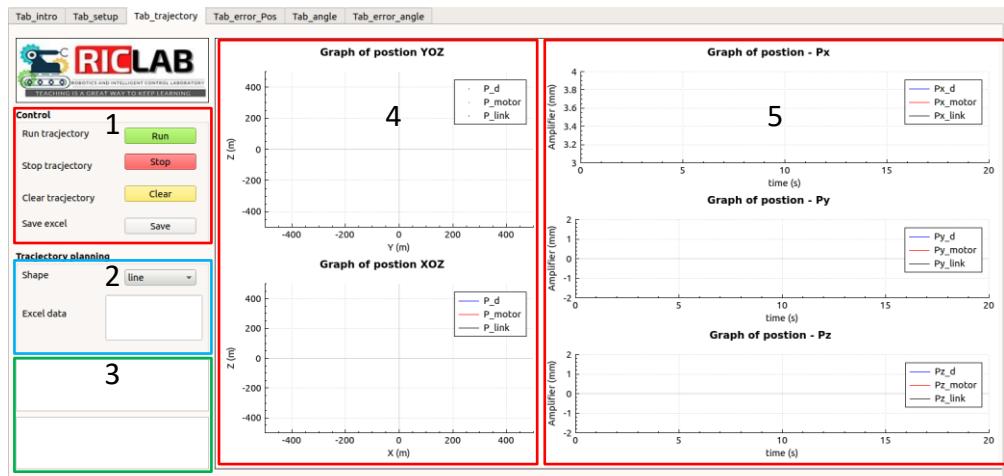
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



Hình 3.54: Tab_setup

Tab_setup có chức năng thiết lập một số kết nối ban UART cần thiết cho quá trình hoạt động của robot và thiết lập vị trí ban đầu cho robot. Các khu vực chức năng trong Tab_setup:

- Khu vực 1 thiết lập kết nối cổng Serial (2 cổng) và điều khiển
- Khu vực 2 điều khiển động cơ chạy chế độ Jog và reset dữ liệu mạch CAN
- Khu vực 3 hiển thị tín hiệu đã gửi, dữ liệu nhận và kích thước bộ nhớ lưu dữ liệu
- Khu vực 4 chọn động cơ và hiển thị tín hiệu đặt, tín hiệu hồi tiếp từ encoder động cơ AC, encoder rời tại khớp robot

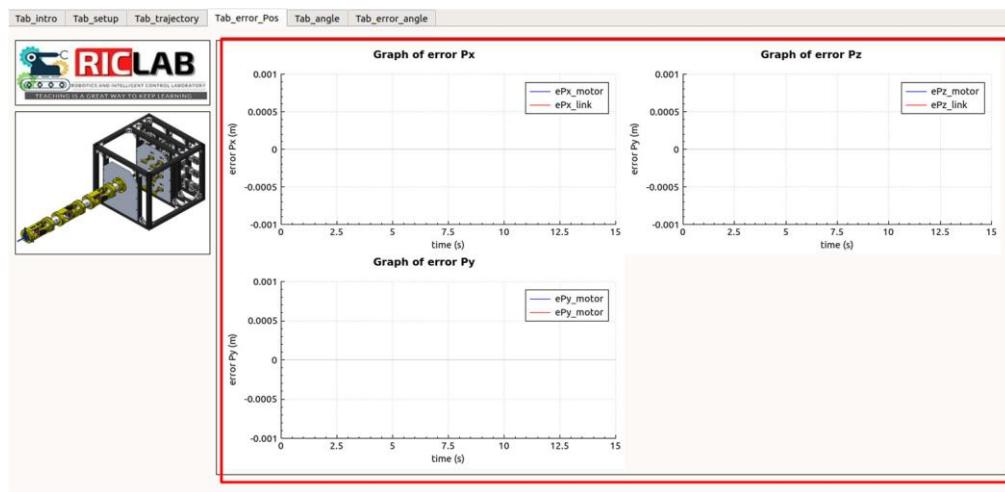


Hình 3.55: Tab_trajectory

Các khu vực chức năng trong tab_trajectory:

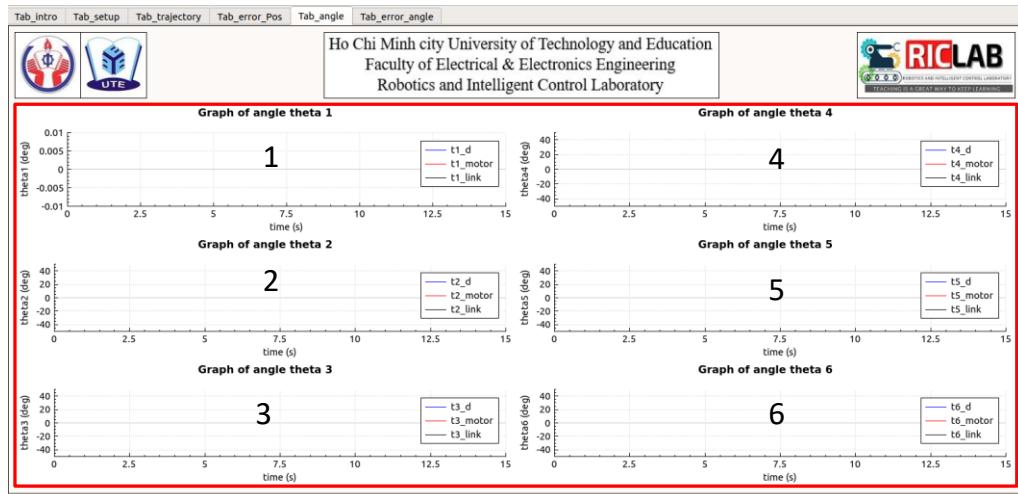
- Khu vực 1 điều khiển mô hình theo quỹ đạo đã chọn và lưu dữ file excel
- Khu vực 2 chọn hình dạng quy hoạch quỹ đạo (đường thẳng – line, 2 đường thẳng – 3 points, quỹ đạo đường tròn – cycle) và đặt tên file excel
- Khu vực 3 hiển thị dữ liệu vị trí joystick, kích thước mảng lưu dữ liệu và vận tốc trung bình của end effector
- Khu vực 4 đồ thị vị trí end effector tại các mặt phẳng
- Khu vực 5 đồ thị vị trí end effector theo thời gian

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



Hình 3.56: Tab_error_Pos

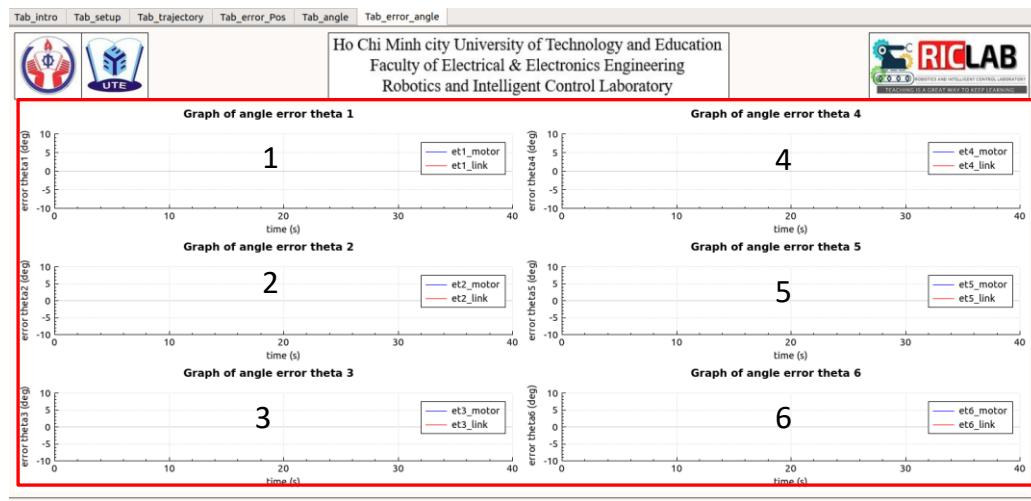
Tab_error_Pos hiển thị sai số vị trí end effector của robot theo hai dạng tín hiệu encoder động cơ AC và encoder rời tại khớp của robot.



Hình 3.57: Tab_angle

Tab_angle hiển thị dữ liệu giá trị các góc của robot theo tín hiệu đặt, tín hiệu hồi tiếp từ động cơ AC Servo, tín hiệu hồi tiếp từ encoder rời tại khớp. Các giá trị góc $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ hiển thị theo đồ thị lần lượt là 1, 2, 3, 4, 5, 6.

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG



Hình 3.58: Tab_error_angle

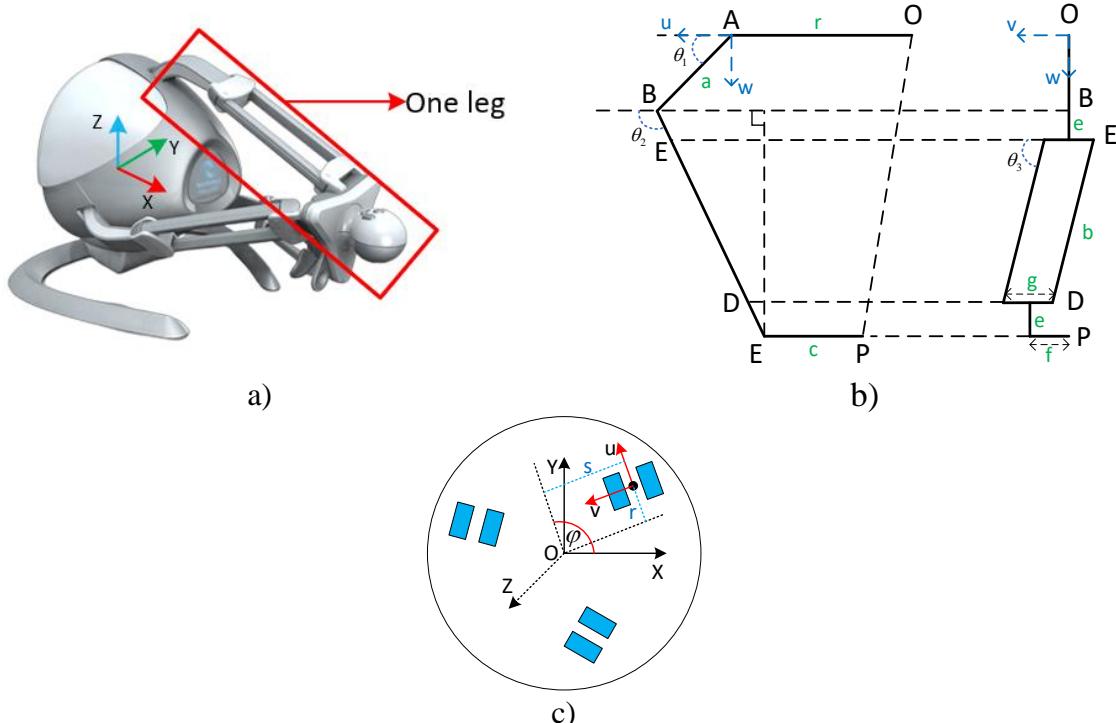
Tab_error_angle hiển thị sai số các giá trị góc so với tín hiệu đặt, sai số tại các khớp hiển thị lần lượt theo đồ thị số 1, 2, 3, 4, 5, 6 tương ứng với sai số tại các khớp $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ của robot.

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

Trong chương này, nhóm sẽ trình bày về phương pháp tính động học cho thiết bị joystick theo cấu trúc robot song song delta 3 bậc tự do. Trình bày hệ trục tọa độ của robot 6 bậc tự do, phương pháp giải động học nghịch theo đại số và theo phương pháp Jacobian.

4.1 Động học joystick

4.1.1 Động học nghịch joystick



Hình 4.1: a) Hệ trục tọa độ của thiết bị haptic; b) động học 1 cánh tay của thiết bị haptic; c) góc nhìn hệ trục từ đế robot

Dựa vào Hình 4.1, ta có thể mô tả các vector như sau:

$$\overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OA} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BE} + \overrightarrow{EP} \quad (4.1)$$

Trong đó các thành phần ở vế bên phải là:

$$\overrightarrow{AB} = [a \cos(\theta_1) \ 0 \ a \sin(\theta_1)]^T \quad (4.2)$$

$$\overrightarrow{BE} = [\cos(\theta_2)BE \ b \cos(\theta_3) \ BE \sin(\theta_3)]^T \quad (4.3)$$

$$\overrightarrow{EP} = [-c \ -f \ 0]^T \quad (4.4)$$

Mà đoạn thẳng BE là:

$$BE = e + b \sin(\theta_3) + d \quad (4.5)$$

Thay công thức (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) vào công thức (4.1) ta được:

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

$$\overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{OA} = \begin{bmatrix} a \cos(\theta_1) \\ 0 \\ a \sin(\theta_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_2)(e + \sin(\theta_3) + d) \\ b \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c \\ -f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Dựa vào Hình 4.1c, ta có thể thấy $\overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{OA} = \overrightarrow{AP}$, tọa độ điểm P có mối liên hệ với điểm A so với hệ trục UVW.

Giả sử, chúng ta có tọa độ điểm P trong hệ tọa độ XYZ, tiếp theo là ánh xạ điểm P sang hệ tọa độ UVW theo các ma trận xoay hoặc ma trận tịnh tiến như sau:

$$\begin{cases} \overrightarrow{OP} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \\ \overrightarrow{OA} = [r \ -s \ 0]^T \end{cases} \quad (4.7)$$

Viết lại công thức (4.7) ta được:

$$\begin{cases} \overrightarrow{OP} = \begin{bmatrix} P_x \cos \varphi + P_y \sin \varphi \\ P_y \cos \varphi - P_x \sin \varphi \\ P_z \end{bmatrix} \\ \overrightarrow{OA} = [r \ -s \ 0]^T \end{cases} \quad (4.8)$$

Mà $\overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{OA} = [P_u \ P_v \ P_w]^T$:

$$\begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos(\theta_1) \\ 0 \\ a \sin(\theta_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \\ b \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c \\ -f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Viết lại công thức (4.9), vị trí điểm P trong hệ trục tọa độ UVW:

$$\begin{cases} P_u = a \cos(\theta_1) - c + \cos(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \\ P_v = b \cos(\theta_3) - f \\ P_w = a \sin(\theta_1) + \sin(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \end{cases} \quad (4.10)$$

– Tính góc θ_3

Theo công thức (4.10) ta được:

$$P_v = b \cos(\theta_3) - f \quad (4.11)$$

Kết quả góc θ_3 là:

$$\theta_3 = \pm a \cos\left(\frac{P_v + f}{b}\right) \quad (4.12)$$

– Tính góc θ_1

Từ công thức (4.10), ta có hệ phương trình:

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

$$\begin{cases} P_u = a \cos(\theta_1) - c + \cos(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \\ P_w = a \sin(\theta_1) + \sin(\theta_2)(e + b \sin(\theta_3) + d) \end{cases} \quad (4.13)$$

Bình phương hai vế công thức (4.13):

$$\begin{cases} (P_u + c - a c_1)^2 = c_2^2 (e + b s_3 + d)^2 \\ (P_w - a s_1)^2 = s_2^2 (e + b s_3 + d)^2 \end{cases} \quad (4.14)$$

Khai triển công thức (4.14), ta được phương trình như sau:

$$2(P_u + c) a c_1 + 2P_w a s_1 = -(P_u + c)^2 - a^2 - P_w^2 - (e + b s_3 + d)^2 \quad (4.15)$$

Đặt các hệ số

$$\begin{cases} A_{temp} = 2(P_u + c)a \\ B_{temp} = 2P_w a \\ C_{temp} = -(P_u + c)^2 - a^2 - P_w^2 - (e + b s_3 + d)^2 \end{cases}$$

Phương trình (4.15) được viết lại thành:

$$A_{temp} c_1 + B_{temp} s_1 = C \quad (4.16)$$

Đặt các biến như sau:

$$\begin{cases} u = \tan \frac{\theta_1}{2} \\ \cos \theta_1 = \frac{1 - u^2}{1 + u^2} \\ \sin \theta_1 = \frac{2u}{1 + u^2} \end{cases} \quad (4.17)$$

Biến đổi công thức (4.16) được phương trình:

$$A_{temp} (1 - u^2) + 2B_{temp} u = C_{temp} (1 + u^2) \quad (4.18)$$

Viết lại công thức (4.18):

$$(A_{temp} + C_{temp}) u^2 - 2B_{temp} u + (C_{temp} - A_{temp}) = 0 \quad (4.19)$$

Nghiệm của phương trình (4.19) có hai lời giải như sau:

$$u = \frac{B_{temp} \pm \sqrt{B_{temp}^2 + A_{temp}^2 - C_{temp}^2}}{A_{temp} + C_{temp}} \quad (4.20)$$

Giá trị góc θ_1

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{B_{temp} \pm \sqrt{B_{temp}^2 + A_{temp}^2 - C_{temp}^2}}{A_{temp} + C_{temp}} \right) \quad (4.21)$$

– Tính góc θ_2

Từ hệ phương trình trong công thức (4.13), biến đổi các vế theo giá trị cos và sin:

$$\begin{cases} \cos(\theta_2) = \frac{P_u + c - a \cos(\theta_1)}{(e + b \sin(\theta_3) + d)} \\ \sin(\theta_2) = \frac{P_w - a \sin(\theta_1)}{(e + b \sin(\theta_3) + d)} \end{cases} \quad (4.22)$$

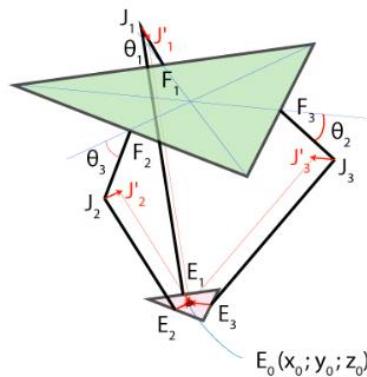
Giá trị góc θ_2 là:

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{P_w - a \sin(\theta_1)}{P_u + c - a \cos(\theta_1)} \right) \quad (4.23)$$

4.1.2 Động học thuận joystick

Để giải động học thuận cho robot song song 3 bậc tự do, chúng ta có được các góc xoay $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ để tìm ra vị trí end – effector cho robot.

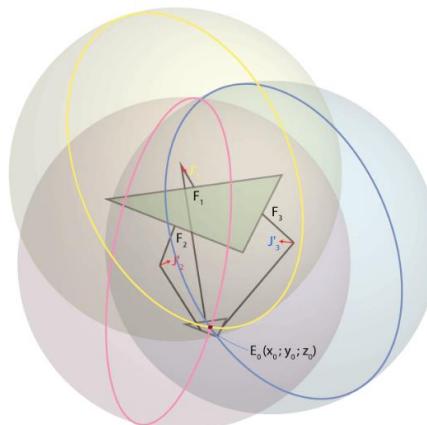
Cấu trúc của robot song song 3 bậc tự do được mô tả như sau:



Hình 4.2: Cấu trúc của robot song song 3 bậc tự do

Trong đó θ_i là góc xoay thứ i tại mỗi khớp trong mặt phẳng đế, J_i là điểm tại khớp xoay thứ 2 trên một cánh tay robot $i = 1, 2, 3$.

Phương pháp được mô tả như sau: dựa vào giá trị đã biết của góc θ_i có thể tính toán được tọa độ của mỗi điểm J_i . Chọn tâm mặt cầu là J_i có bán kính là $J_i E_i$. Nếu di chuyển mặt cầu theo một vector $\overrightarrow{E_i E_0}$, ta sẽ có 1 mặt cầu mới và điểm giao giữa 3 mặt cầu này là tọa độ điểm E_0 .



CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

Hình 4.3: Hình ảnh mô tả phương pháp 3 mặt cầu

Gọi J_1, J_2 và J_3 là tâm mặt cầu sau khi dời trực. ta có thể xoay chuyển đổi điểm J trong hệ trục UVW sang hệ tọa độ XYZ:

$$\begin{bmatrix} J_{xi} \\ J_{yi} \\ J_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_i) & -\sin(\varphi_i) & 0 \\ \sin(\varphi_i) & \cos(\varphi_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{ui} - r \\ J_{vi} + s \\ J_{wi} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Với trường hợp cánh tay thứ 1 trong hệ trục $U_1V_1W_1$, $i = 1$:

$$\overrightarrow{A_1B_1} + \overrightarrow{B_1J_1} = \overrightarrow{A_1J_1} \quad (4.25)$$

Tính vector $\overrightarrow{A_1B_1} = [a \cos(\theta_1) \ 0 \ a \sin(\theta_1)]^T$:

$$\overrightarrow{EP} = [-c \ -f \ 0]^T$$

$$\overrightarrow{BJ} = [J_x - a \cos(\theta_1) \ J_y \ J_z - a \sin(\theta_1)]$$

Mà vector $\overrightarrow{B_1J_1}$ bằng vector $\overrightarrow{E_1P_1}$, ta có:

$$\begin{cases} J_{u1} - a \cos(\theta_1) = -c \\ J_{v1} = -f \\ J_{w1} - a \sin(\theta_1) = 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

Tọa độ của điểm J_1 trong hệ trục tọa độ $U_1V_1W_1$:

$$J_1 = [a \cos(\theta_1) - c \ -f \ a \sin(\theta_1)]^T \quad (4.27)$$

Tọa độ điểm J_1 trong hệ trục tọa độ XYZ:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} J_{x1} \\ J_{y1} \\ J_{z1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & 0 \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos(\theta_1) - c - r \\ -f + s \\ a \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a \cos(\theta_1) \cos(\varphi_1) - c \cos(\varphi_1) - r \cos(\varphi_1) + f \sin(\varphi_1) - s \sin(\varphi_1) \\ a \cos(\theta_1) \sin(\varphi_1) - c \sin(\varphi_1) - r \sin(\varphi_1) - f \cos(\varphi_1) + s \cos(\varphi_1) \\ a \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Tương tự, ta có tọa độ điểm J_2 và J_3 :

$$\begin{bmatrix} J_{x2} \\ J_{y2} \\ J_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos(\theta_1) \cos(\varphi_2) - c \cos(\varphi_2) - r \cos(\varphi_2) + f \sin(\varphi_2) - s \sin(\varphi_2) \\ a \cos(\theta_2) \sin(\varphi_2) - c \sin(\varphi_2) - r \sin(\varphi_2) - f \cos(\varphi_2) + s \cos(\varphi_2) \\ a \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\begin{bmatrix} J_{x3} \\ J_{y3} \\ J_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos(\theta_3) \cos(\varphi_3) - c \cos(\varphi_3) - r \cos(\varphi_3) + f \sin(\varphi_3) - s \sin(\varphi_3) \\ a \cos(\theta_3) \sin(\varphi_3) - c \sin(\varphi_3) - r \sin(\varphi_3) - f \cos(\varphi_3) + s \cos(\varphi_3) \\ a \sin(\theta_3) \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

Phương trình 3 mặt cầu với tọa độ mặt cầu đã tìm được:

$$\begin{cases} (x - J_{x1})^2 + (y - J_{y1})^2 + (z - J_{z1})^2 = BE^2 \\ (x - J_{x2})^2 + (y - J_{y2})^2 + (z - J_{z2})^2 = BE^2 \\ (x - J_{x3})^2 + (y - J_{y3})^2 + (z - J_{z3})^2 = BE^2 \end{cases} \quad (4.31)$$

Khai triển công thức (4.31) ta được:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xJ_{x1} - 2yJ_{y1} - 2zJ_{z1} + J_{x1}^2 + J_{y1}^2 + J_{z1}^2 = BE^2 \quad (4.32)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xJ_{x2} - 2yJ_{y2} - 2zJ_{z2} + J_{x2}^2 + J_{y2}^2 + J_{z2}^2 = BE^2 \quad (4.33)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xJ_{x3} - 2yJ_{y3} - 2zJ_{z3} + J_{x3}^2 + J_{y3}^2 + J_{z3}^2 = BE^2 \quad (4.34)$$

Đặt $q_i = J_{xi}^2 + J_{yi}^2 + J_{zi}^2$, $i = 1, 2, 3$

$$-2x(J_{x1} - J_{x2}) - 2y(J_{y1} - J_{y2}) - 2z(J_{z1} - J_{z2}) + q_1 - q_2 = 0 \quad (4.35)$$

$$-2x(J_{x1} - J_{x3}) - 2y(J_{y1} - J_{y3}) - 2z(J_{z1} - J_{z3}) + q_1 - q_3 = 0 \quad (4.36)$$

$$-2x(J_{x2} - J_{x3}) - 2y(J_{y2} - J_{y3}) - 2z(J_{z2} - J_{z3}) + q_2 - q_3 = 0 \quad (4.37)$$

Từ công thức (4.37), ta biến đổi như sau:

$$\begin{cases} y = \frac{2x(J_{x2} - J_{x3}) - q_2 + q_3 + 2z(J_{z2} - J_{z3})}{-2(J_{y2} - J_{y3})} \\ x = \frac{2y(J_{y2} - J_{y3}) + 2z(J_{z2} - J_{z3}) - q_2 + q_3}{-2(J_{x2} - J_{x3})} \end{cases} \quad (4.38)$$

Thay giá trị x, y vào công thức (4.35) ta được:

$$\frac{2yB_2A_3}{A_2} - 2yB_3 + \frac{2zC_2A_3}{A_2} - 2zC_3 + \frac{-q_2 + q_3}{A_2} A_3 + q_1 - q_3 = 0 \quad (4.39)$$

$$\frac{2yB_2A_3}{A_2} - 2yB_3 + \frac{2zC_2A_3}{A_2} - 2zC_3 + \frac{-q_2 + q_3}{A_2} A_3 + q_1 - q_3 = 0 \quad (4.40)$$

Bảng 4.1: Ký hiệu viết gọn

Ký hiệu viết tắt	Biến	Ký hiệu viết tắt	Biến	Ký hiệu viết tắt	Biến
A_1	$J_{x1} - J_{x2}$	B_1	$J_{y1} - J_{y2}$	C_1	$J_{z1} - J_{z2}$
$.A_2.$	$J_{x2} - J_{x3}$	B_2	$J_{y1} - J_{y2}$	C_2	$J_{z2} - J_{z3}$
A_3	$J_{x1} - J_{x3}$	B_3	$J_{y1} - J_{y3}$	C_3	$J_{z1} - J_{z3}$

Từ phương trình (4.39) và (4.40), ta đặt các biến như sau:

$$\begin{cases} m_1 = -2A_1 + \frac{2A_2B_1}{B_2} \\ n_1 = -2C_1 + \frac{2C_2B_1}{B_2} \\ k_1 = \frac{q_2 - q_3}{B_2} B_1 + q_1 - q_2 \end{cases} \text{ và } \begin{cases} m_2 = \frac{2B_2A_3}{A_2} - 2B_3 \\ n_2 = \frac{2C_2A_3}{A_2} - 2C_3 \\ k_2 = \frac{-q_2 + q_3}{A_2} A_3 + q_1 - q_3 \end{cases}$$

Kết hợp công thức (4.39) và (4.40) ta được:

$$\begin{cases} m_1x + n_1z + k_1 = 0 \\ m_2y + n_2z + k_2 = 0 \end{cases} \quad (4.41)$$

Ta có thể tìm vị trí end effector của robot:

$$\begin{cases} x = -\frac{n_1z + k_1}{m_1} \\ y = -\frac{n_2z + k_2}{m_2} \end{cases} \quad (4.42)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xJ_{x1} - 2yJ_{y1} - 2zJ_{z1} + J_{x1}^2 + J_{y1}^2 + J_{z1}^2 = BE^2 \quad (4.43)$$

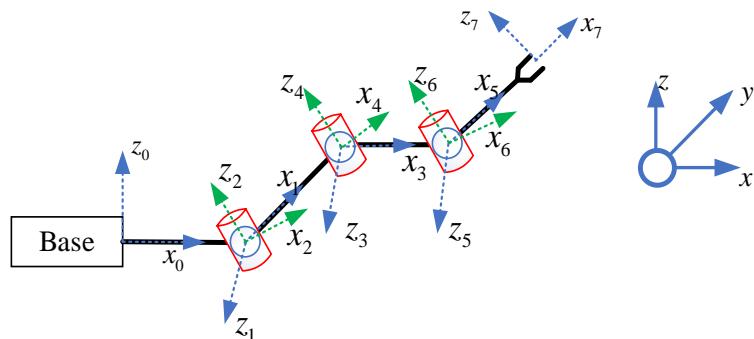
$$\begin{aligned} & \left(-\frac{n_1z + k_1}{m_1}\right)^2 + \left(-\frac{n_2z + k_2}{m_2}\right)^2 + z^2 + 2\left(\frac{n_1z + k_1}{m_1}J_{x1} + \frac{n_2z + k_2}{m_2}J_{y1} - zJ_{z1}\right) \\ & = BE^2 - q_1 \end{aligned} \quad (4.44)$$

Giải phương trình bậc 2 trong (4.44) thu được nghiệm giá trị z , tuy nhiên tọa độ điểm của joystick theo trục Z có giá trị dương nên bộ nghiệm âm sẽ bị loại. Sau khi có được tọa độ z , thay vào công thức (4.42) được giá trị x và y .

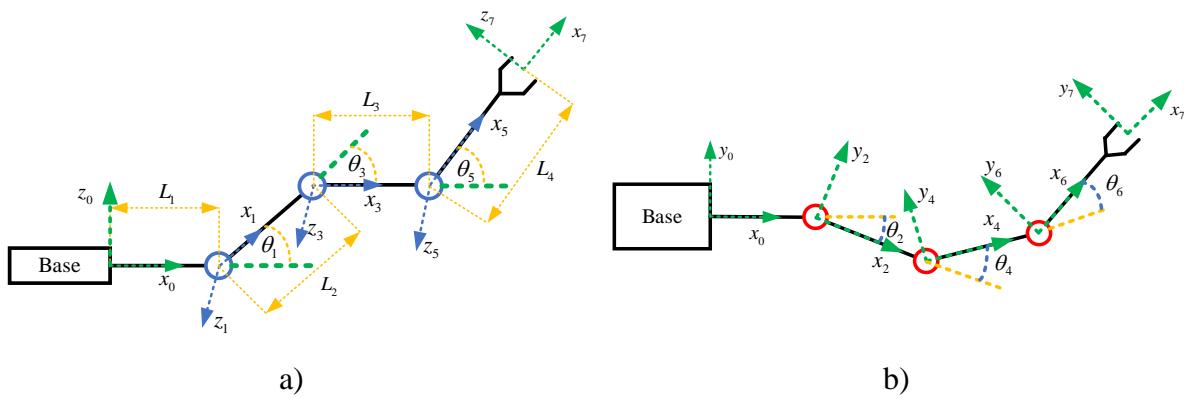
4.2 Động học robot cáp 6 bậc tự do

4.2.1 Đặt trực robot cáp 6 bậc tự do

Hệ trực tổng quát của robot cáp 6 bậc tự do được đặt như hình sau:



Hình 4.4: Hệ trực tọa độ của robot



Hình 4.5: a) Góc nhìn theo hệ tọa độ XOZ; b) góc nhìn theo hệ tọa độ XOY

Trong đó θ_i là góc lệch giữa hệ trục tọa độ thứ i so với hệ trục tọa độ $i-1$; L_i là chiều dài của mỗi link.

4.2.2 Động học thuận robot cáp 6 bậc tự do

Sau khi đặt hệ trục cho robot, ta lập bảng D-H như sau:

Bảng 4.2: bảng D-H của robot cáp 6 bậc tự do

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i	Giới hạn góc
1	L_1	90	0	θ_1	-30 ~ 30
2	0	-90	0	θ_2	-30 ~ 30
3	L_2	90	0	θ_3	-45 ~ 45
4	0	-90	0	θ_4	-45 ~ 45
5	L_3	90	0	θ_5	-45 ~ 45
6	0	-90	0	θ_6	-45 ~ 45
7	L_4	0	0	0	0

Trong đó biến i có giá trị $\{1, 2, 3, \dots, 6, 7\}$; a_i là khoảng cách từ trục Z_i đến Z_{i+1} theo trục X_i ; α_i là góc khi xoay trục Z_i đến Z_{i+1} theo trục X_i ; d_i là khoảng cách giữa hai trục X_{i-1} và X_i theo trục Z_i ; θ_i là góc lệch giữa trục X_{i-1} với X_i theo trục Z_i .

Ta có ma trận chuyển đổi của robot từ gốc tọa độ thứ $i-1$ đến i :

$${}^{i-1}T^i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Với $c\theta_i$ là $\cos(\theta_i)$; $s\theta_i$ là $\sin(\theta_i)$; $c\alpha_i$ là $\cos(\alpha_i)$; $s\alpha_i$ là $\sin(\alpha_i)$.

Ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ 0 đến hệ tọa độ 1:

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

$${}^0_1 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & a_0 \\ s\theta_1 c\alpha_0 & c\theta_1 c\alpha_0 & -s\alpha_0 & -s\alpha_0 d_1 \\ s\theta_1 s\alpha_0 & c\theta_1 s\alpha_0 & c\alpha_0 & c\alpha_0 d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

$${}^1_2 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_1 \\ s\theta_2 c\alpha_1 & c\theta_2 c\alpha_1 & -s\alpha_1 & -s\alpha_1 d_2 \\ s\theta_2 s\alpha_1 & c\theta_2 s\alpha_1 & c\alpha_1 & c\alpha_1 d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$${}^2_3 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 c\alpha_2 & c\theta_3 c\alpha_2 & -s\alpha_2 & -s\alpha_2 d_3 \\ s\theta_3 s\alpha_2 & c\theta_3 s\alpha_2 & c\alpha_2 & c\alpha_2 d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$${}^3_4 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_3 \\ s\theta_4 c\alpha_3 & c\theta_4 c\alpha_3 & -s\alpha_3 & -s\alpha_3 d_4 \\ s\theta_4 s\alpha_3 & c\theta_4 s\alpha_3 & c\alpha_3 & c\alpha_3 d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

$${}^4_5 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & a_4 \\ s\theta_5 c\alpha_4 & c\theta_5 c\alpha_4 & -s\alpha_4 & -s\alpha_4 d_5 \\ s\theta_5 s\alpha_4 & c\theta_5 s\alpha_4 & c\alpha_4 & c\alpha_4 d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$${}^5_6 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & a_5 \\ s\theta_6 c\alpha_5 & c\theta_6 c\alpha_5 & -s\alpha_5 & -s\alpha_5 d_6 \\ s\theta_6 s\alpha_5 & c\theta_6 s\alpha_5 & c\alpha_5 & c\alpha_5 d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$${}^6_7 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_7 & -s\theta_7 & 0 & a_6 \\ s\theta_7 c\alpha_6 & c\theta_7 c\alpha_6 & -s\alpha_6 & -s\alpha_6 d_7 \\ s\theta_7 s\alpha_6 & c\theta_7 s\alpha_6 & c\alpha_6 & c\alpha_6 d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ 0 đến hệ tọa độ thứ 7:

$${}^0_7 \mathbf{T} = {}^0_1 \mathbf{T} {}^1_2 \mathbf{T} {}^2_3 \mathbf{T} {}^3_4 \mathbf{T} {}^4_5 \mathbf{T} {}^5_6 \mathbf{T} {}^6_7 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

4.2.2.1 Vị trí của end – effector

Dựa vào kết quả tính toán ở phương trình (4.53), ta có vị trí end – effector của robot được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} P_x = & -L_3(c_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) + c_1s_2s_4) + L_4(s_6(s_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - c_1c_4s_2) \\ & - c_6(c_5(c_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) + c_1s_2s_4) + s_5(c_3s_1 + c_1c_2s_3))) + L_1 + L_2c_1c_2 \end{aligned} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned} P_y = & L_4(c_6(c_5(c_2s_4 + c_3c_4s_2) - s_2s_3s_5) + s_6(c_2c_4 - c_3s_2s_4)) \\ & + L_3(c_2s_4 + c_3c_4s_2) + L_2s_2 \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} P_z = & L_3(c_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) - s_1s_2s_4) - L_7(s_6(s_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) + c_4s_1s_2) \\ & - c_6(c_5(c_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) - s_1s_2s_4) + s_5(c_1c_3 - c_2s_1s_3))) + L_2c_2s_1 \end{aligned} \quad (4.56)$$

4.2.2.2 Các thành phần trong ma trận hướng

Dựa vào kết quả tính toán ở phương trình (4.53), ta có các thành phần ma trận hướng được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} r_{11} = & s_6(s_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - c_1c_4s_2) - c_6(c_5(c_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) + c_1s_2s_4) \\ & + s_5(c_3s_1 + c_1c_2s_3)) \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} r_{12} = & c_6(s_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - c_1c_4s_2) + s_5(c_3s_1 + c_1c_2s_3) \\ & + s_6(c_5(c_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) + c_1s_2s_4)) \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$r_{13} = s_5(c_4(s_1s_3 - c_1c_2c_3) + c_1s_2s_4) - c_5(c_3s_1 + c_1c_2s_3) \quad (4.59)$$

$$r_{21} = c_6(c_5(c_2s_4 + c_3c_4s_2) - s_2s_3s_5) + s_6(c_2c_4 - c_3s_2s_4) \quad (4.60)$$

$$r_{22} = c_6(c_2c_4 - c_3s_2s_4) - s_6(c_5(c_2s_4 + c_3c_4s_2) - s_2s_3s_5) \quad (4.61)$$

$$r_{23} = -s_5(c_2s_4 + c_3c_4s_2) - c_5s_2s_3 \quad (4.62)$$

$$\begin{aligned} r_{31} = & c_6(c_5(c_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) - s_1s_2s_4) + s_5(c_1c_3 - c_2s_1s_3)) \\ & - s_6(s_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) + c_4s_1s_2) \end{aligned} \quad (4.63)$$

$$\begin{aligned} r_{32} = & -c_6(s_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) + c_4s_1s_2) \\ & - s_6(c_5(c_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) - s_1s_2s_4) + s_5(c_1c_3 - c_2s_1s_3)) \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$r_{33} = c_5(c_1c_3 - c_2s_1s_3) - s_5(c_4(c_1s_3 + c_2c_3s_1) - s_1s_2s_4) \quad (4.65)$$

4.2.3 Giải động học nghịch robot cáp bằng phương pháp đại số

Từ ma trận chuyển vị cuối của robot ${}^0_7\mathbf{T}$ ta có được ma trận sau:

$${}^0_7\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

Trong đó vị trí end effector đã biết và các thành phần trong ma trận hướng biết được thông qua các góc Euler.

Thay công thức (4.57) vào công thức (4.54) ta được:

$$P_x = L_1 + L_4 r_{11} - L_3 (c_4 (s_1 s_3 - c_1 c_2 c_3) + c_1 s_2 s_4) + L_2 c_1 c_2 \quad (4.67)$$

Thay công thức (4.60) vào công thức (4.55) ta được:

$$P_y = L_4 r_{21} + L_3 (c_2 s_4 + c_3 c_4 s_2) + L_2 s_2 \quad (4.68)$$

Thay công thức (4.63) vào công thức (4.56) ta được:

$$P_z = L_3 (c_4 (c_1 s_3 + c_2 c_3 s_1) - s_1 s_2 s_4) + L_1 r_{31} + L_2 c_2 s_1 \quad (4.69)$$

Giả sử ta có được ma trận ${}^0_4 T$ có dạng như sau:

$${}^0_4 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & x \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & y \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

Trong đó:

$$x = L_1 + L_2 c_1 c_2 \quad (4.71)$$

$$y = L_2 s_2 \quad (4.72)$$

$$z = L_2 c_2 s_1 \quad (4.73)$$

$$t_{11} = -c_4 (s_1 s_3 - c_1 c_2 c_3) - c_1 s_2 s_4 \quad (4.74)$$

$$t_{12} = s_4 (s_1 s_3 - c_1 c_2 c_3) - c_1 c_4 s_2 \quad (4.75)$$

$$t_{13} = -c_3 s_1 - c_1 c_2 s_3 \quad (4.76)$$

$$t_{21} = c_2 s_4 + c_3 c_4 s_2 \quad (4.77)$$

$$t_{22} = c_2 c_4 - c_3 s_2 s_4 \quad (4.78)$$

$$t_{23} = -s_2 s_3 \quad (4.79)$$

$$t_{31} = c_4 (c_1 s_3 + c_2 c_3 s_1) - s_1 s_2 s_4 \quad (4.80)$$

$$t_{32} = -s_4 (c_1 s_3 + c_2 c_3 s_1) - c_4 s_1 s_2 \quad (4.81)$$

$$t_{33} = c_1 c_3 - c_2 s_1 s_3 \quad (4.82)$$

Thay phương trình (4.74) vào phương trình (4.67) ta được:

$$P_x = L_1 + L_4 r_{11} + L_3 t_{11} + L_2 c_1 c_2 \quad (4.83)$$

Thay phương trình (4.77) vào phương trình (4.68) ta được:

$$P_y = L_4 r_{21} + L_3 t_{21} + L_2 s_2 \quad (4.84)$$

Thay phương trình (4.80) vào phương trình (4.69) ta được:

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

$$P_z = L_3 t_{31} + L_l r_{31} + L_2 c_2 s_1 \quad (4.85)$$

- Tính góc θ_1

Chia công thức (4.85) cho công thức (4.83):

$$\frac{s_1}{c_1} = \frac{P_x - L_1 - L_4 r_{11} - L_3 t_{11}}{P_z - L_3 t_{31} - L_l r_{31}} \quad (4.86)$$

Từ công thức trên, ta có phương trình tính toán θ_1 như sau:

$$\theta_1 = a \tan 2(P_x - L_1 - L_4 r_{11} - L_3 t_{11}, P_z - L_3 t_{31} - L_l r_{31}) \quad (4.87)$$

- Tính góc θ_2

Từ công thức (4.85) ta được:

$$c_2 = \frac{P_z - L_3 t_{31} - L_l r_{31}}{L_2 s_1} \quad (4.88)$$

Từ công thức (4.84) và (4.88) ta được

$$\theta_2 = a \tan 2\left(\frac{P_y - L_4 r_{21} - L_3 t_{21}}{L_2}, \frac{P_z - L_3 t_{31} - L_l r_{31}}{L_2 s_1}\right) \quad (4.89)$$

- Tính góc θ_3

Ta có hệ phương trình theo công thức (4.76) và (4.82):

$$\begin{cases} -c_3 s_1 - c_1 c_2 s_3 = t_{13} \\ c_1 c_3 - c_2 s_1 s_3 = t_{33} \end{cases} \quad (4.90)$$

Nghiệm của phương trình là:

$$c_3 = -s_1 t_{13} + c_1 t_{33} \quad (4.91)$$

$$s_3 = \frac{-s_1 t_{33} - c_1 t_{13}}{c_2} \quad (4.92)$$

Vậy góc θ_3 được tính như sau:

$$\theta_3 = a \tan 2(s_3, c_3) \quad (4.93)$$

- Tính góc θ_4

Ta có hệ phương trình theo công thức (4.77) và (4.78):

$$\begin{cases} c_2 s_4 + c_3 c_4 s_2 = t_{21} \\ -c_3 s_2 s_4 + c_2 c_4 = t_{22} \end{cases} \quad (4.94)$$

Nghiệm của phương trình là:

$$s_4 = \frac{t_{21} c_2 - t_{22} c_3 s_2}{c_2^2 - c_1 c_3 s_2} \quad (4.95)$$

$$c_4 = \frac{c_2 t_{22} + c_3 s_2 t_{21}}{c_2^2 + c_3^2 s_2^2} \quad (4.96)$$

CHƯƠNG 4: TÍNH TOÁN ĐỘNG HỌC HỆ THỐNG

Vậy góc θ_4 được tính như sau:

$$\theta_4 = a \tan 2(s_4, c_4) \quad (4.97)$$

– Tính góc θ_5

Thay công thức (4.74) và (4.76) vào công thức (4.59) ta có:

$$-s_5 t_{11} + c_5 t_{31} = r_{13} \quad (4.98)$$

Thay công thức (4.77) vào công thức (4.62)

$$-s_5 t_{21} - c_5 s_2 s_3 = r_{23} \quad (4.99)$$

Ta có hệ phương trình theo công thức (4.59) và (4.62):

$$\begin{cases} -s_5 t_{11} + c_5 t_{31} = r_{13} \\ -s_5 t_{21} - c_5 s_2 s_3 = r_{23} \end{cases} \quad (4.100)$$

Nghiệm của hệ phương trình (4.100) là:

$$s_5 = \frac{-s_2 s_3 r_{13} - t_{31} r_{23}}{t_{11} s_2 s_3 + t_{21} t_{31}} \quad (4.101)$$

$$c_5 = \frac{-t_{11} r_{23} + t_{21} r_{13}}{t_{11} s_2 s_3 + t_{21} t_{31}} \quad (4.102)$$

Góc θ_5 được tính như sau:

$$\theta_5 = a \tan 2(s_5, c_5) \quad (4.103)$$

– Tính góc θ_6

Thay công thức (4.77) vào công thức (4.60):

$$c_6 (c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5) + s_6 t_{22} = r_{21} \quad (4.104)$$

Thay công thức (4.77) và (4.78) vào công thức (4.61)

$$c_6 t_{22} - s_6 (c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5) = r_{22} \quad (4.105)$$

Ta có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} c_6 (c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5) + s_6 t_{22} = r_{21} \\ c_6 t_{22} - s_6 (c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5) = r_{22} \end{cases} \quad (4.106)$$

Nghiệm của hệ phương trình là:

$$s_6 = \frac{-r_{21} (c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5) - t_{22} r_{22}}{(c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5)^2 - t_{22}^2} \quad (4.107)$$

$$c_6 = \frac{r_{22} (c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5) - t_{22} r_{21}}{(c_5 t_{21} - s_2 s_3 s_5)^2 - t_{22}^2} \quad (4.108)$$

Góc θ_6 được tính như sau:

$$\theta_6 = a \tan 2(s_6, c_6) \quad (4.109)$$

Như vậy để giải được bài toán động học nghịch cho robot cáp 6 bậc tự do sẽ cần phải biết được các thành phần vị trí và hướng của ma trận ${}_4^0T$, trong khi dữ liệu có thể có là vị trí và hướng của ma trận ${}_7^0T$ và vị trí của ${}_4^0T$. Vậy thành phần hướng của ma trận ${}_4^0T$ là không biết được, do đó cần có phương pháp cao hơn để giải được bài động học nghịch cho robot này.

4.2.4 Giải động học nghịch robot cáp bằng phương pháp Jacobian

Để giải động học nghịch cho robot theo phương pháp Jacobian pseudoinverse, thực hiện theo các bước như sau:

Các bước tính toán động học nghịch sử dụng phương pháp Jacobians:

Bước 1: chọn vị trí và hướng mong muốn cho robot chuyển động đến.

Bước 2: tính toán sai số giữa vị trí end effector hiện tại và vị trí mong muốn.

$$\mathbf{dx} = \mathbf{X}_g - \mathbf{X} \quad (4.110)$$

Bước 3: tính toán ma trận Jacobian với góc hiện tại.

Bước 4: tính ma trận nghịch đảo Jacobian.

$$\mathbf{J}^{-1} = \mathbf{J}^T \left(\mathbf{J} \mathbf{J}^T \right)^{-1} \quad (4.111)$$

Bước 5: cập nhật giá trị góc.

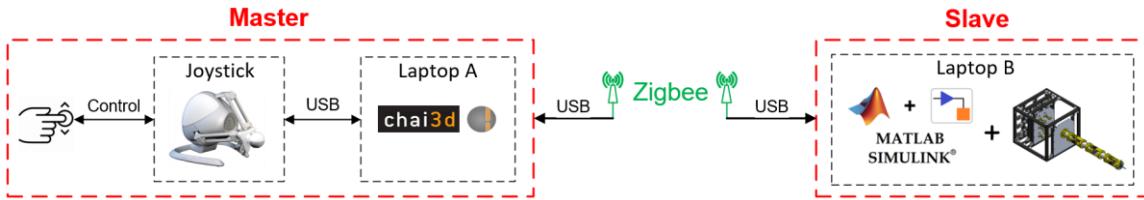
$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} + \alpha \mathbf{J}^{-1} \mathbf{dx} \quad (4.112)$$

Bước 6: nếu vị trí và hướng end effector trùng với điểm mong muốn thì dừng, nếu sai thì quay lại bước 2.

Trong đó: $\mathbf{X}_g \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vector vị trí mong muốn robot di chuyển đến, $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ là vị trí end effector của robot cáp, \mathbf{dx} là vector sai số giữa vị trí mong muốn và vị trí của robot, $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ là vector vị trí góc mỗi khớp của robot, $\alpha \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ là hệ số.

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

5.1 Tổng quan về hệ thống mô phỏng



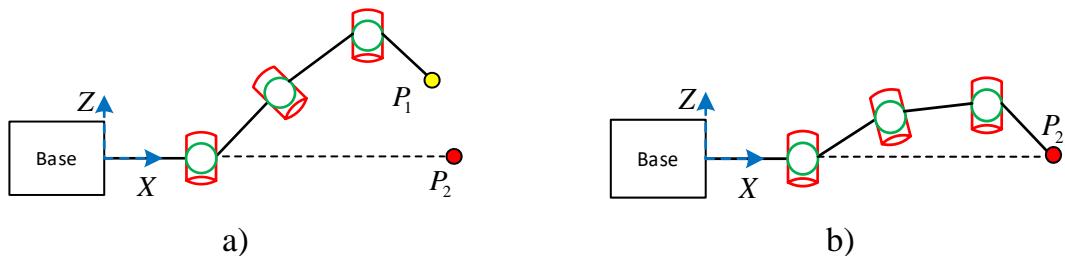
Hình 5.1: Sơ đồ khái niệm mô phỏng hệ thống

Mô tả nhiệm vụ của từng khái niệm:

- Khái niệm master: bao gồm joystick và Laptop A. Trong đó, joystick có nhiệm vụ tạo quỹ đạo chuyển động, tín hiệu vị trí của joystick được Laptop A đọc và tiến hành tính toán ánh xạ vị trí, tạo tín hiệu đặt cho robot cáp và gửi cho khái niệm slave. Bên cạnh đó, Laptop A còn nhận biết những vị trí nằm ngoài không gian làm việc của robot cáp, thực hiện tính toán lực phản hồi và tác động lên joystick.

- Khái niệm slave: bao gồm Laptop B. Trên Laptop B chạy chương trình mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink để mô phỏng mô hình robot cáp 6 bậc tự do. Chương trình này sẽ nhận tín hiệu đặt do khái niệm master gửi đến, tiến hành tính toán động học nghịch bằng phương pháp Jacobian và điều khiển các khớp xoay của mô hình mô phỏng.

5.2 Kiểm chứng động học nghịch sử dụng phương pháp Jacobian



Hình 5.2: a) Minh họa kiểm chứng Jacobian với 2 điểm; b) Vị trí robot sau khi thực hiện thành công phương pháp Jacobian

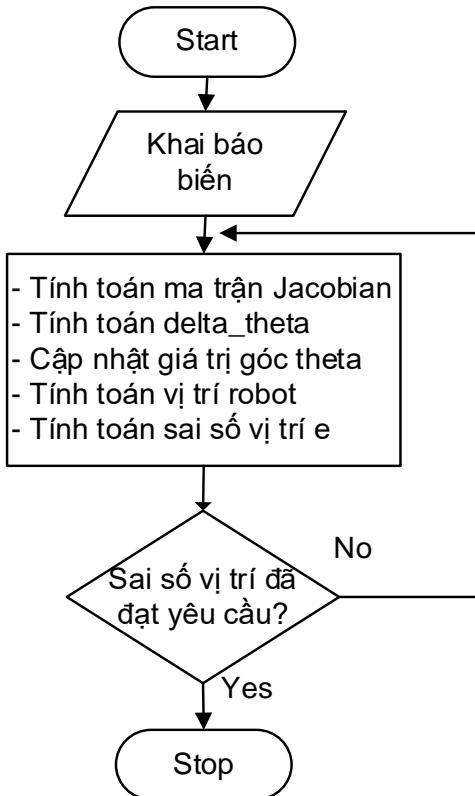
Trong Hình 5.2a giả sử có hai điểm là P_1 và P_2 , trong đó P_1 là vị trí của cánh tay robot, P_2 là vị trí mong muốn robot di chuyển đến, sử dụng phương pháp Jacobian để giải động học nghịch cho cánh tay robot cáp. Kết quả đạt được được minh họa như Hình 5.2b.

Tọa độ điểm ban đầu của robot $P_1(1027.4; -5.3; -5.3)$ mm tương ứng với các góc $\theta_1 = 0; \theta_2 = -1; \theta_3 = -1; \theta_4 = 1; \theta_5 = 1; \theta_6 = 0$, đơn vị deg.

Vị trí điểm mong muốn là điểm $P_2(1000; 50; 50)$ mm.

Lưu đồ thuật toán kiểm chứng phương pháp Jacobian trên Matlab:

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG



Hình 5.3: Lưu đồ kiểm chứng phương pháp Jacobian

Bảng 5.1: Kết quả kiểm chứng phương pháp Jacobian với 2 điểm

	Vị trí ban đầu P_1 (mm)	Vị trí mong muốn P_2 (mm)	Sai số vị trí (10^{-5} mm)
P_x	1027.4	1000	0.07
P_y	-5.3	50	0.9901
P_z	-5.3	50	0.7241

Dựa vào kết quả kiểm chứng trên Bảng 5.1, vị trí của robot sau khi giải động học nghịch bằng phương pháp Jacobian có kết quả giống với điểm P_2 đã cho. Vị trí sau khi giải động học tương đối tốt với sai số vị trí nhỏ khoảng 0.99×10^{-5} mm và nhỏ hơn sai số cho phép là 1×10^{-5} mm.

Kiểm tra một trường hợp khác với vị trí ban đầu là điểm P_1 , nhưng vị trí của điểm P_2 thay đổi thành giá trị bất kỳ.

Bảng 5.2: Kết quả kiểm chứng phương pháp Jacobian với nhiều điểm

Vị trí mong muốn P_{sp} (mm)	Vị trí tính toán P_{rb} (mm)	Sai số trục x (10^{-5} mm)	Sai số trục y (10^{-5} mm)	Sai số trục z (10^{-5} mm)
P_{sp} (900;0;0)	P_{rb} (900;0;0)	0.9134	0.5629	-0.7353
P_{sp} (900;10;-10)	P_{rb} (900;10;-10)	0.9136	0.5788	-0.7519

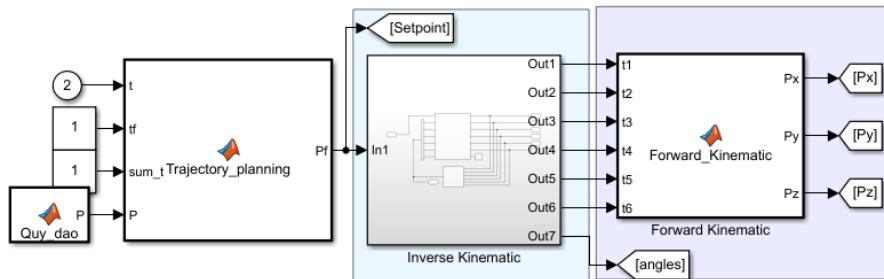
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

$P_{sp}(900; -10; 10)$	$P_{rb}(900; -10; 10)$	0.9133	0.5474	-0.7189
$P_{sp}(900; 20; 10)$	$P_{rb}(900; 20; 10)$	0.9170	0.6014	-0.7176
$P_{sp}(900; 10; 40)$	$P_{rb}(900; 10; 40)$	0.9191	0.5911	-0.6683
$P_{sp}(950; 84; 50)$	$P_{rb}(950; 84; 50)$	0.8300	0.7841	-0.9629
$P_{sp}(950; 02; 58)$	$P_{rb}(950; 02; 58)$	0.8867	0.3451	-0.9802
$P_{sp}(950; 64; 29)$	$P_{rb}(950; 64; 29)$	0.7464	0.6081	-0.9760
$P_{sp}(950; 45; 50)$	$P_{rb}(950; 45; 50)$	0.8180	0.5599	-0.9497
$P_{sp}(950; 96; 32)$	$P_{rb}(950; 96; 32)$	0.7566	0.7766	-0.9718

Dựa vào sai số các trục x, y và z, ở mỗi điểm mong muốn khác nhau, phương pháp Jacobian đều giải thành công vị trí cho robot với sai số nhỏ hơn 1×10^{-5} mm. Các điểm được chọn ngẫu nhiên không phải điểm kỳ dị cho robot.

5.3 Mô phỏng quy hoạch quỹ đạo cho robot cáp

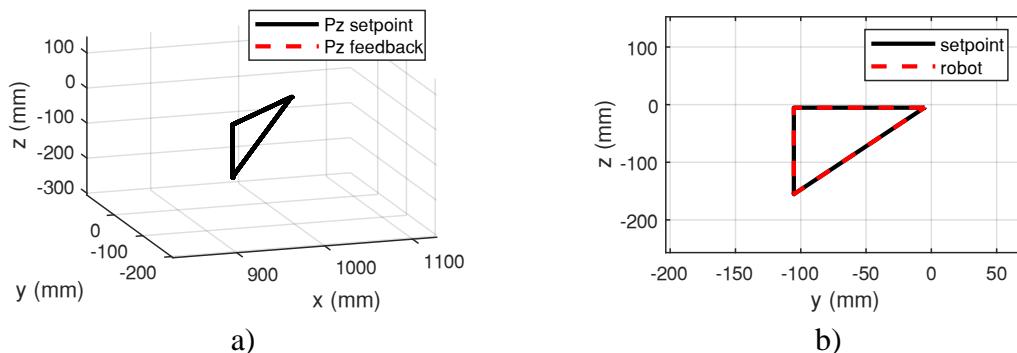
Sau khi kiểm chứng tính đúng đắn của phương pháp Jacobian với 1 điểm cho trước. Công việc tiếp theo, nhóm sẽ thực hiện quy hoạch quỹ đạo cho robot. Quỹ đạo thực hiện thí nghiệm lần lượt là: hình tam giác, đường tròn. Sơ đồ mô phỏng trên Matlab Simulink được mô tả như sau:



Hình 5.4: Sơ đồ mô phỏng phương pháp Jacobian với quỹ đạo quy hoạch

5.3.1 Mô phỏng quy hoạch quỹ đạo hình tam giác

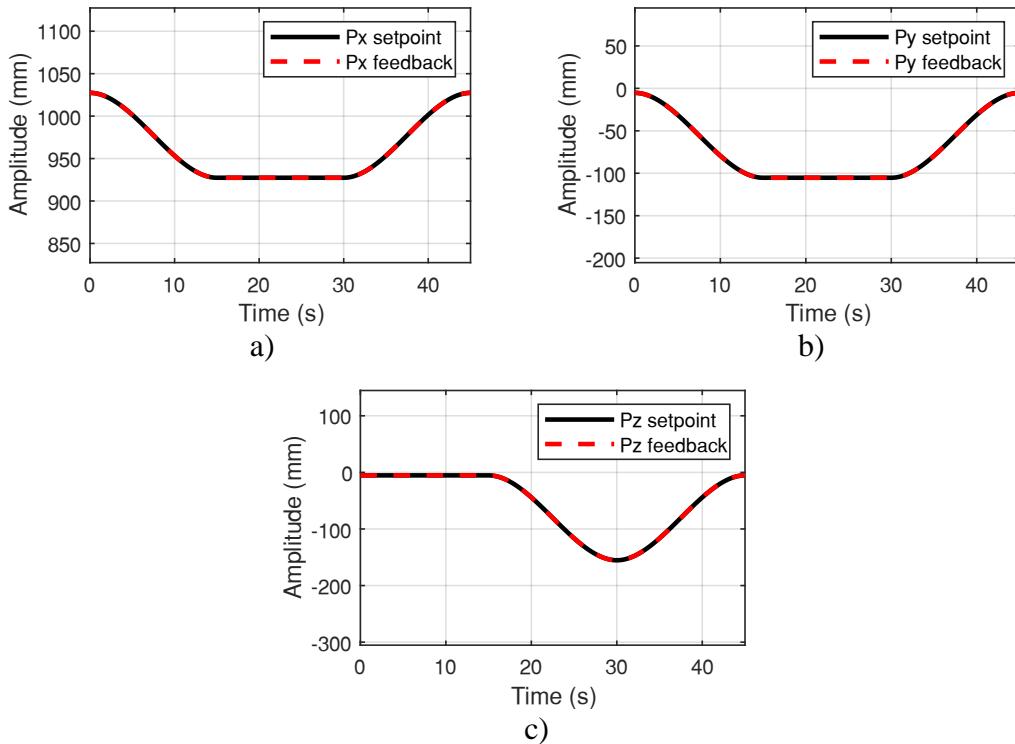
Trường hợp tiếp theo mô phỏng chuyển động của robot theo quỹ đạo hình tam giác. Tọa độ các điểm mô phỏng lần lượt là: $P_1(1027.4; -5.3; -5.3)$, $P_2(950; 50; 10)$, $P_3(950; 50; -50)$. Kết quả mô phỏng quỹ đạo tam giác:



Hình 5.5: Quy hoạch quỹ đạo hình tam giác bằng phương pháp Jacobian a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

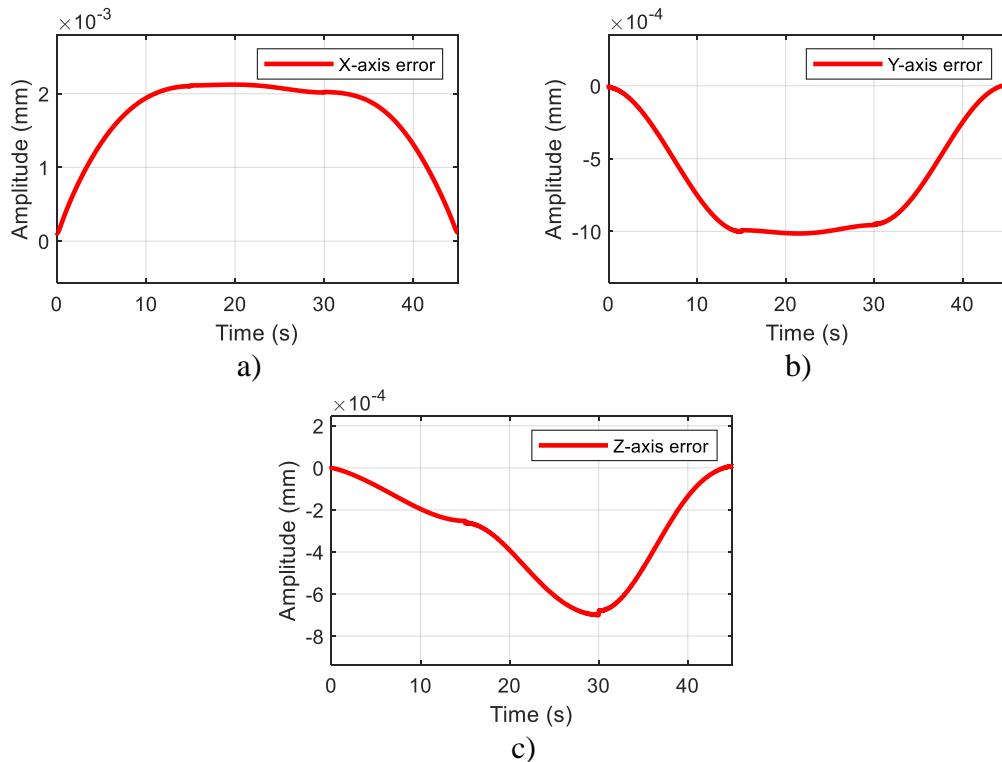
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Qua Hình 5.5, tín hiệu của robot bám theo quỹ đạo đặt đã cho trước. Tín hiệu ổn định không bị vọt lồ trong quá trình di chuyển.



Hình 5.6: Đáp ứng của robot với quỹ đạo hình tam giác a) trục x; b) trục y; c) trục z

Sai số trong thí nghiệm quỹ đạo hình tam giác có kết quả ổn định, giá trị sai số nhỏ khoảng 10^{-3} mm.

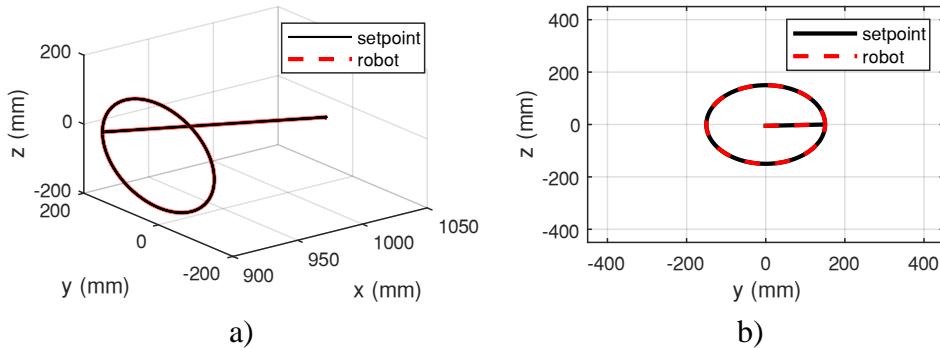


Hình 5.7: Sai số vị trí của robot theo với quỹ đạo hình tam giác; a) trục x; b) trục y; c) trục z

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

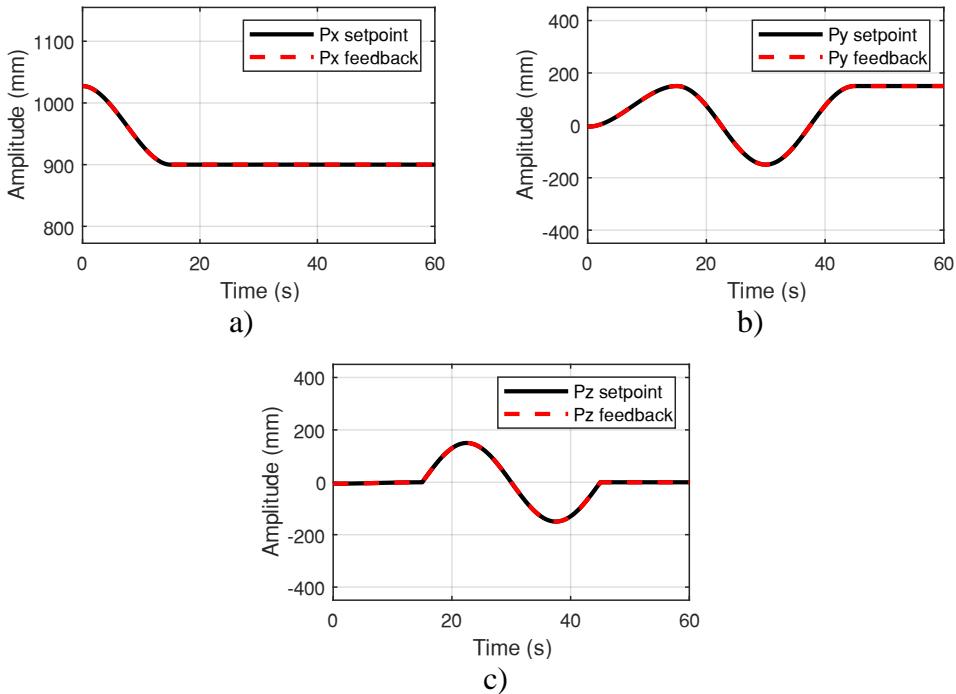
5.3.2 Mô phỏng quy hoạch quỹ đạo hình tròn

Một thí nghiệm khác được sử dụng để mô phỏng quỹ đạo cho robot cáp 6 bậc tự do, quy hoạch theo quỹ đạo hình tròn có toạ độ tại điểm $O(900;0;0)$ với bán kính $R = 150$ mm.

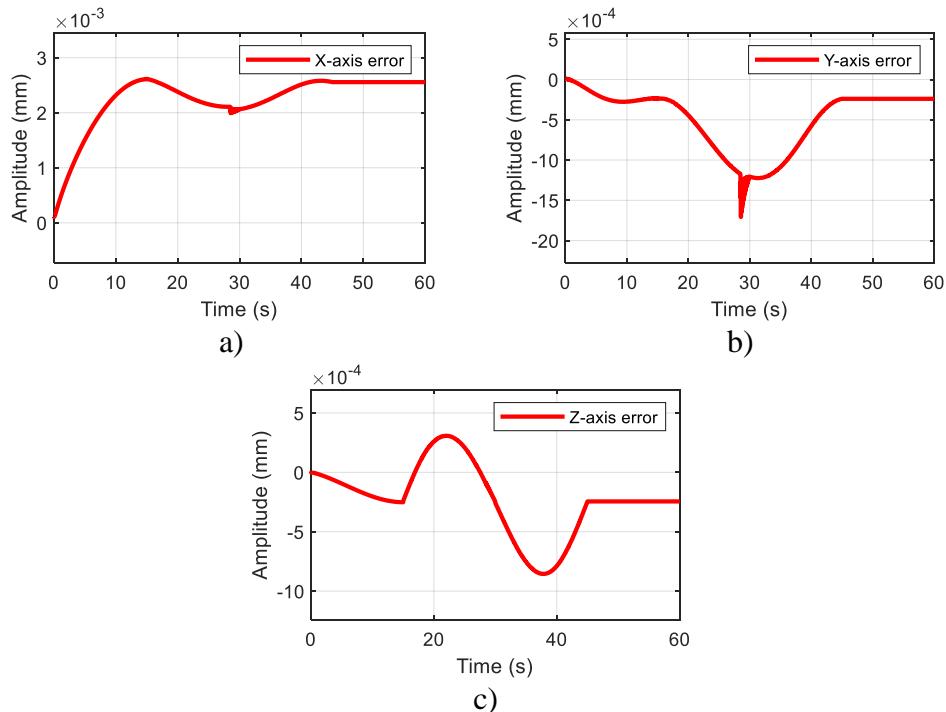


Hình 5.8: Quy hoạch quỹ đạo hình tròn bằng phương pháp Jacobian a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

Robot sẽ xuất phát tại vị trí home: $P_1(1027.4; -5.3; -5.3)$ đến vị trí điểm đầu tiên trong đường tròn và tiếp tục chạy quy hoạch trong một chu kỳ đường tròn.



Hình 5.9: Đáp ứng vị trí của robot với quỹ đạo hình tròn a) trục x; b) trục y; c) trục z



Hình 5.10: Sai số vị trí của robot với quỹ đạo hình tròn a) trục x; b) trục y; c) trục z

Quan sát tín hiệu đáp ứng vị trí theo thời gian, vị trí của robot bám theo tín hiệu đặt. Sai số theo các trục X, Y, Z nhỏ khoảng 10^{-3} mm.

Như vậy qua hai phần mô phỏng quy hoạch quỹ đạo cho robot, phương pháp Jacobian trong giải động học nghịch cho kết quả tương đối tốt, ổn định, sai số bám nhỏ.

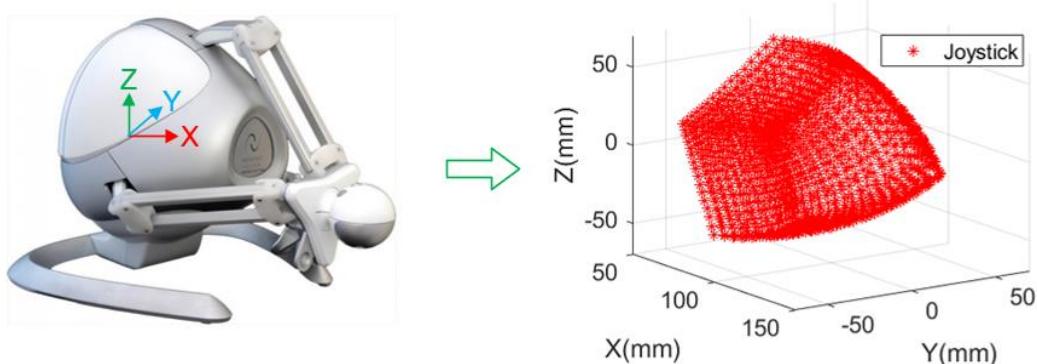
5.4 Các bước xây dựng hệ thống điều khiển từ xa

Bước 1: Xác định toàn bộ không gian làm việc của slave và master

Từ cấu trúc cơ khí nên xét các góc giới hạn trên joystick như sau:

$$\begin{cases} -45^\circ \leq \theta_1 \leq 45^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_2 \leq 45^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_3 \leq 45^\circ \end{cases}$$

Ta được không gian làm việc của joystick được mô tả trong Hình 5.11:



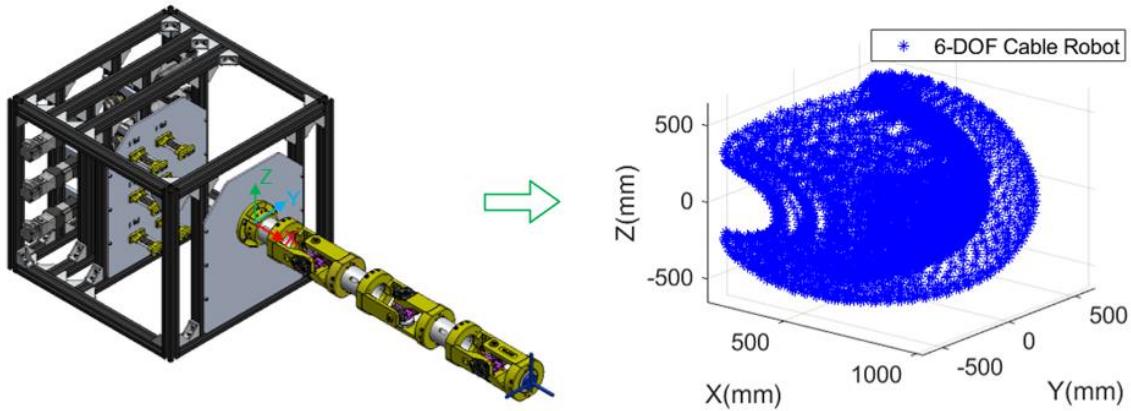
Hình 5.11: Không gian làm việc của thiết bị joystick

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Từ cấu trúc cơ khí nên xét các góc giới hạn trên robot cáp 6 bậc tự do:

$$\begin{cases} -30^\circ \leq \theta_1 \leq 30^\circ \\ -30^\circ \leq \theta_2 \leq 30^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_3 \leq 45^\circ \end{cases} \quad \begin{cases} -45^\circ \leq \theta_4 \leq 45^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_5 \leq 45^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_6 \leq 45^\circ \end{cases}$$

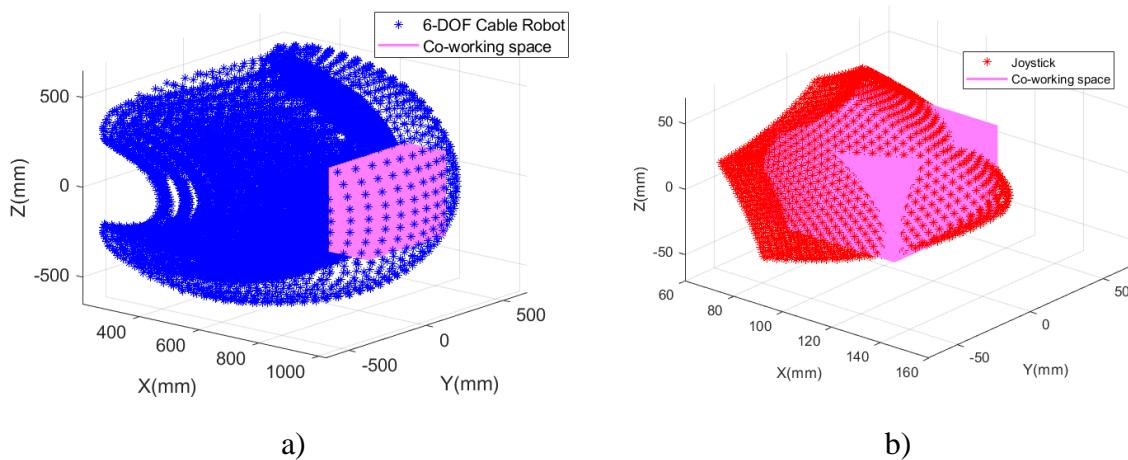
Ta được không gian làm việc của robot cáp được mô tả trong Hình 5.12:



Hình 5.12: Không gian làm việc của robot cáp 6 bậc tự do

Bước 2: Lựa chọn vùng không gian làm việc chung của 2 robot

Từ các giới hạn không gian làm việc mong muốn mà ta muốn robot làm việc thì ta lựa chọn được vùng không gian giới hạn trên robot cáp như sau: $x \in [841, 1000]$; $y \in [-210, 210]$; $z \in [-210, 210]$ đơn vị mm. Tương tự với joystick ta chọn được vùng làm việc mong muốn như sau: $x \in [72, 125]$; $y \in [-35, 35]$ và $z \in [-35, 35]$ đơn vị mm. Vùng không gian được biểu thị như hình:



Hình 5.13: Vùng không gian làm việc chung giữa a) robot cáp 6 bậc tự do b) joystick

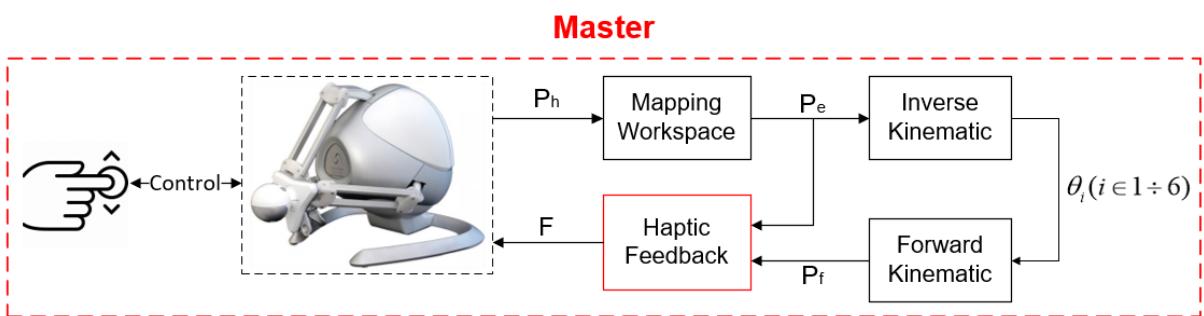
Bước 3: Tính toán các thông số ánh xạ thích hợp

Tù không gian làm việc mà ta đã lựa chọn ta có thể tính được hệ số khuếch đại và vị trí điểm làm việc ảo theo công thức (2.26) như sau:

$$k = \text{diag}([3 \ 6 \ 6]); \mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$$

5.4.1 Áp dụng phương pháp phản hồi lực vào hệ thống điều khiển từ xa

Phương pháp ánh xạ bên trên còn tồn tại những nhược điểm làm cho không gian chúng ta lựa chọn bị giới hạn trong những vùng cố định. Áp dụng phương pháp phản hồi lực giúp người dùng cảm nhận chân thực hơn trong lúc điều khiển robot di chuyển và mở rộng vùng không gian cần chạm tới. Khi người dùng điều khiển robot ra bên ngoài vùng không gian làm việc thì sẽ tạo ra một lực tác động ở end effector của joystick giúp người dùng cảm nhận được xúc giác và không điều khiển robot ra ngoài vùng không gian làm việc nữa.

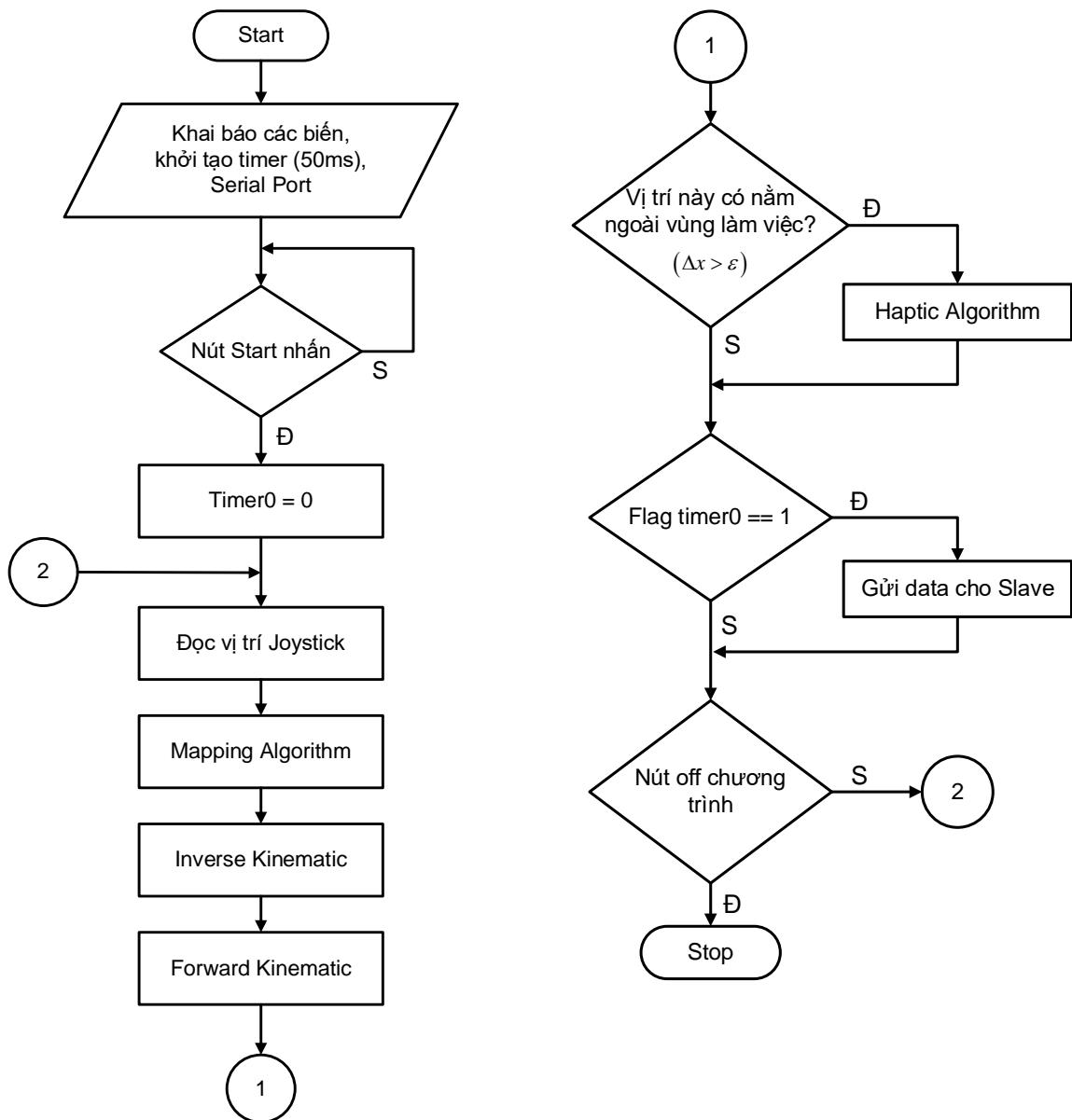


Hình 5.14: Tổng quan về phương pháp áp dụng cho phản hồi lực

Thiết bị điều khiển joystick ngoài nhiệm vụ tạo quỹ đạo chuyển động, tiền đề cho tín hiệu đặt của robot còn có nhiệm vụ phản hồi lực để giúp người vận có cảm nhận trực quan khi điều khiển robot thực hiện các tác vụ. Do cấu trúc robot không tương đồng giữa joystick điều khiển và robot cáp 6 bậc tự do, nên khi người vận hành thao tác trên joystick sẽ có những điểm thuộc không gian làm việc của joystick tuy nhiên lại nằm ngoài không gian làm việc của robot cáp, khi đó joystick sẽ cung cấp những tín hiệu đặt mà robot cáp không thể nào đáp ứng được.

Để giải quyết nhược điểm trên, tín hiệu vị trí của joystick (P_h) sau khi qua phương pháp ánh xạ (P_e) sẽ được tính toán bằng phương pháp Jacobian để tìm ra lời giải cho bài toán động học nghịch của robot cáp. Kết quả của lời giải động học nghịch sẽ được kiểm chứng bằng cách dùng ma trận đồng nhất trong bài toán động học thuận của robot cáp để tính toán vị trí lại một lần nữa và sau đó đổi chiều vị trí này (P_f) với vị trí sau khi ánh xạ. Nếu vị trí ánh xạ (P_e) và vị trí tính toán đổi chiều bằng động học thuận (P_f) vẫn sai khác một lượng lớn hơn hoặc bằng lượng sai số có thể chấp nhận được ϵ (mm) thì xác nhận vị trí hiện tại nằm ngoài không gian làm việc và thực hiện chế độ phản hồi lực. Thuận toán phản hồi lực được thực hiện trên Master nên chưa áp dụng cho việc sử dụng dữ liệu vị trí robot từ Slave phản hồi về.

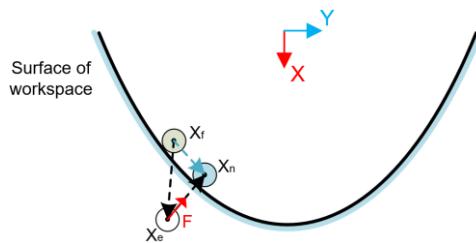
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG



Hình 5.15: Lưu đồ hoạt động của Master trong hệ thống điều khiển từ xa kết hợp phản hồi lực

5.4.1.1 Trường hợp phản hồi lực

Dưới đây mô tả trường hợp điều khiển robot đi ra bên ngoài vùng không gian làm việc và được phản hồi lực tác động đưa robot vào bên trong vùng không gian làm việc:



Hình 5.16: Diễn biến lực phản hồi khi robot ở vùng điểm nằm ngoài không gian làm việc

Trong đó X_e là vị trí đặt của robot slave sau khi qua phương pháp mapping workspace, X_f là vị trí phản hồi của robot slave ở bên trong vùng không gian làm việc, X_n là vị trí di chuyển mới mà lực tạo ra ở end effector của robot master đưa robot slave

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

về vị trí nằm bên trong không gian làm việc, F là lực tác động từ giải thuật haptic. Như Hình 5.16 khi ta điều khiển robot master di chuyển từ một điểm bên trong không gian làm việc ra bên ngoài vùng không gian làm việc thì sẽ có một lực kéo lại giúp đưa điểm này về lại vùng bên trong không gian làm việc, tùy vào hệ số ta lựa chọn mà lực tác động có xu hướng vào bên trong vùng không gian làm việc. Do hệ số đàn hồi ta chọn theo trục x, y và z không bằng nhau mà có xu hướng lệch theo trục x nên lực sẽ có xu hướng hướng vào trong trục x.

5.4.1.2 Lưu đồ kết hợp giữa thuật toán ánh xạ và phương pháp haptic

Lưu đồ kết hợp giữa thuật toán ánh xạ và phương pháp haptic được mô tả:

Thuật toán	
1. Đầu vào:	$P_h \in R^{3 \times 1}, \Delta x \in R^{3 \times 1}, v \in R^{3 \times 1}$
2. Đầu ra:	$P_e \in R^{3 \times 1}, f \in R^{3 \times 1}$
3. Các biến khởi tạo:	$k \in R^{3 \times 3}, P_w \in R^{3 \times 1}, k_s \in R^{3 \times 3}, c \in R^{3 \times 3}$
4. While (not termination condition) do	
5.	Đọc vị trí từ thiết bị haptic Novint Falcon P_h
6.	Áp dụng giải thuật ánh xạ đồng nhất không gian làm việc $P_e = kP_h + P_w$, P_e là vị trí gửi xuống slave robot
8.	if (Vị trí đặt là điểm ngoài không gian làm việc)
9.	Thực hiện chế độ haptic $f = k_s \Delta x + cv$, f là lực tác động lên Joystick
10.	else
11.	Chạy ở chế độ bình thường
12.	end

5.4.2 Khảo sát các thông số của hệ thống phản hồi lực

Với công thức tính toán lực phản hồi đã được trình bày ở công thức (2.28) và xác định được trường hợp chế độ phản hồi lực hoạt động, nhóm tiến hành khảo sát các thông số độ cứng lò xo k_s và hệ số giảm chấn c để tìm hiểu sự ảnh hưởng của các thông số này đối với trải nghiệm của người vận hành đối với hệ thống phản hồi lực. Dưới đây là bảng các trường hợp khảo sát:

Bảng 5.3: Khảo sát các thông số hệ thống phản hồi lực

Tên khảo sát	Độ cứng lò xo k_s (N/m)	Hệ số giảm chấn c (Ns/m)
Khảo sát k_s	0.2	3
	0.5	3

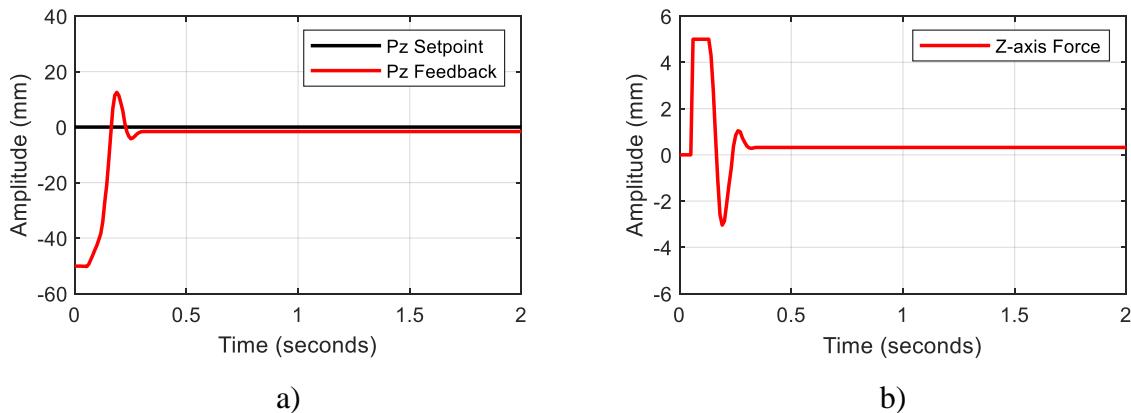
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

	1	3
Khảo sát c	0.2	1
	0.2	5
	0.2	9

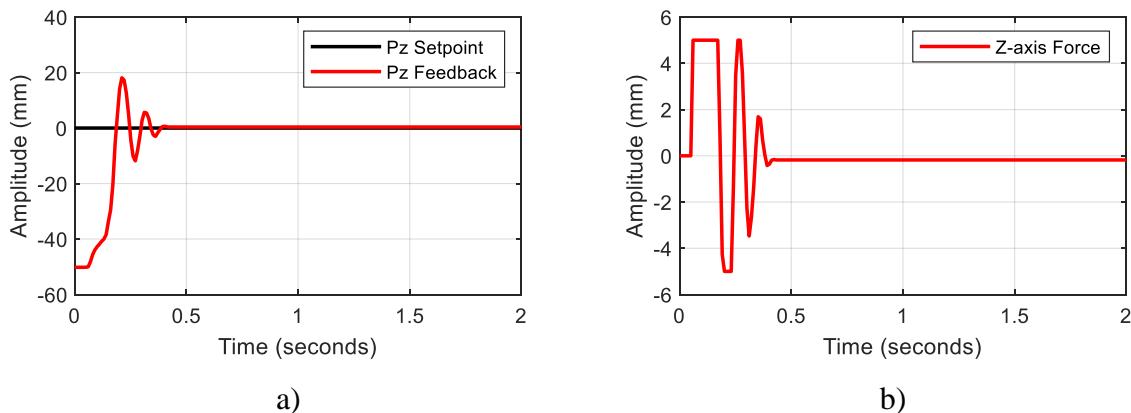
Việc khảo sát được thực hiện với trục z của joystick, kết quả khảo sát được trình bày dưới đây:

- **Khảo sát độ cứng lò xo k_s**

Thay đổi hệ số $k_s \in (0.2 \div 1.5)$ và $c = 3$ ta quan sát đáp ứng của hệ thống:

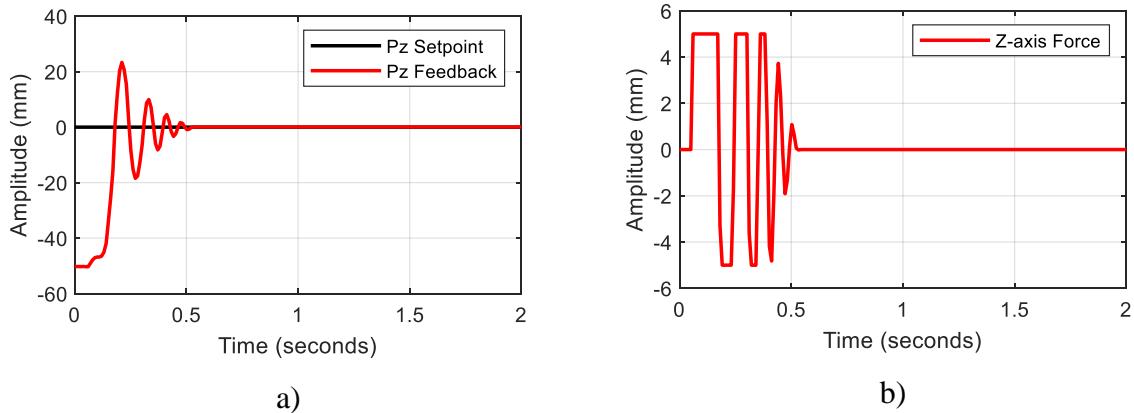


Hình 5.17: Khảo sát các thông số lực phản hồi với $k_s = 0.2$ và $c = 3$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick



Hình 5.18: Khảo sát các thông số lực phản hồi với $k_s = 0.5$ và $c = 3$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick

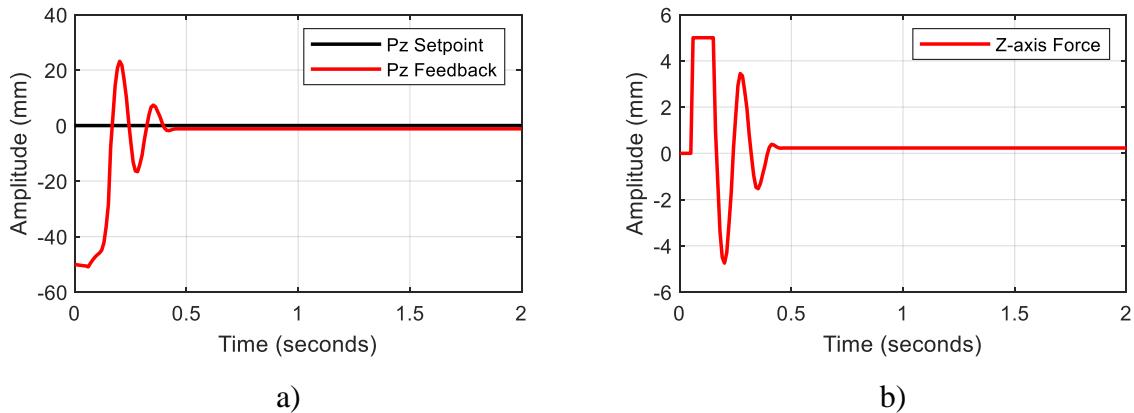
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG



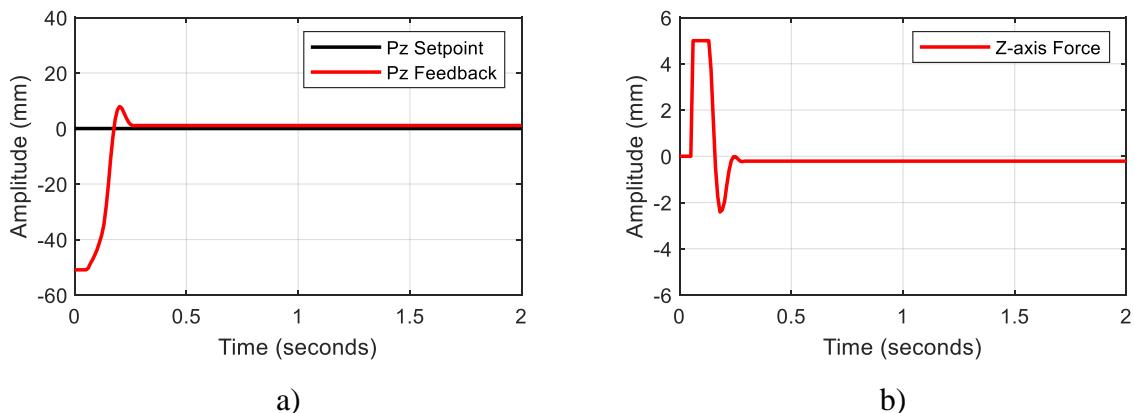
Hình 5.19: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 1$ và $c = 3$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick

- **Khảo sát hệ số giảm chấn c**

Thay đổi hệ số $c \in (1 \div 12)$ và $k_s = 0.2$ ta quan sát đáp ứng của hệ thống:

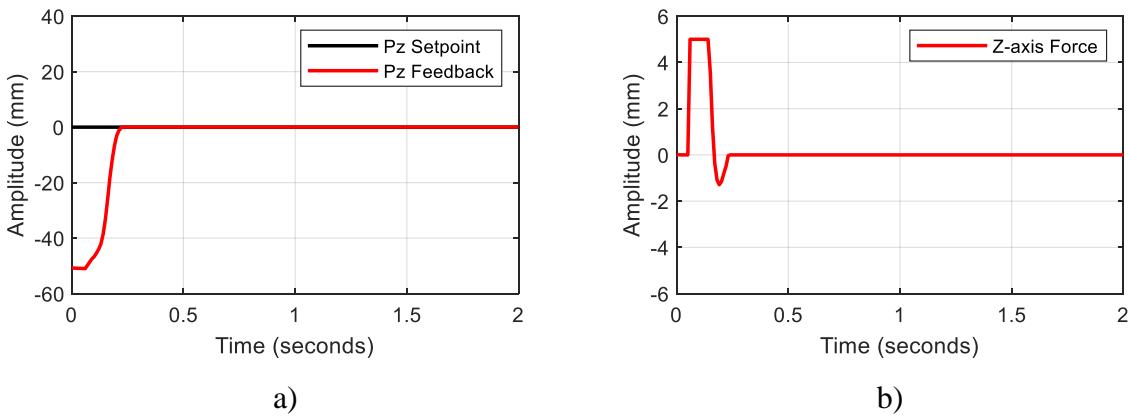


Hình 5.20: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 0.2$ và $c = 1$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick



Hình 5.21: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 0.2$ và $c = 5$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

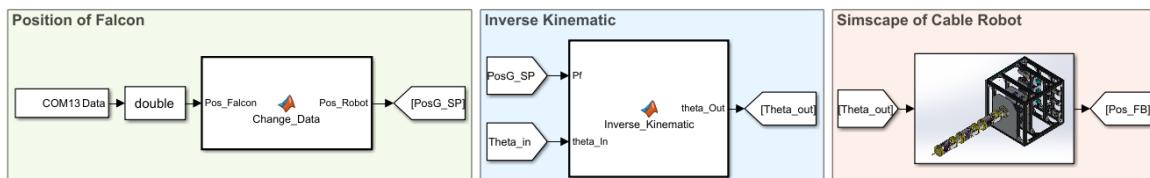


Hình 5.22: Khảo sát các thông số phản hồi lực với $k_s = 0.2$ và $c = 9$ a) đáp ứng vị trí trục z joystick; b) sai số vị trí trục z joystick

Từ các khảo sát các thông số ảnh hưởng đến lực phản hồi, ta rút ra kết luận khi tăng hệ số k_s thì hệ thống càng dễ dao động và thời gian xác lập sẽ tăng dần tỷ lệ thuận theo hệ số k_s . Khi tăng hệ số c thì hệ thống ổn định hơn nhưng tăng quá cao thì hệ thống tồn tại sai số xác lập.

Với các bản khảo sát sự thay đổi về độ cứng lò xo k_s và hệ số giảm chấn c ta lựa chọn bộ thông số $\mathbf{k}_s = diag([0.2 \ 0.2 \ 0.2])$ và $\mathbf{c} = diag([9 \ 9 \ 9])$ để có được chất lượng của lực phản hồi lực là tốt nhất và giúp người vận hành có cảm nhận chân thực nhất vận hành với hệ thống.

5.5 Mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực



Hình 5.23: Mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực

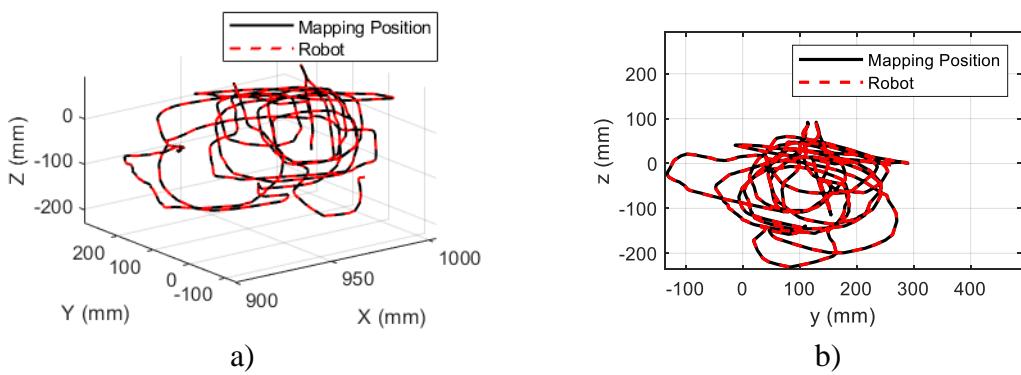
Máy tính thứ 2 sẽ nhận dữ liệu thông qua Serial để đọc vị trí sau giải thuật ánh xạ từ đó tách ra các vị trí theo trục x, y và z để đưa vào khôi động học nghịch tính toán ra các góc xoay. Tiếp đến các góc xoay sẽ được cấp cho mô hình Simscape để di chuyển đến vị trí mà ta mong muốn.

Vị trí của robot sẽ được lấy sau giải thuật ánh xạ số (2.25) ta sẽ đưa 2 robot về chung một không gian làm việc mà mình chọn trên slave robot, nếu ta ánh xạ cả 2 vùng không gian làm việc của 2 robot chung với nhau thì sẽ có những khoảng không gian làm việc riêng của từng robot mà không giao nhau như Hình 5.13.

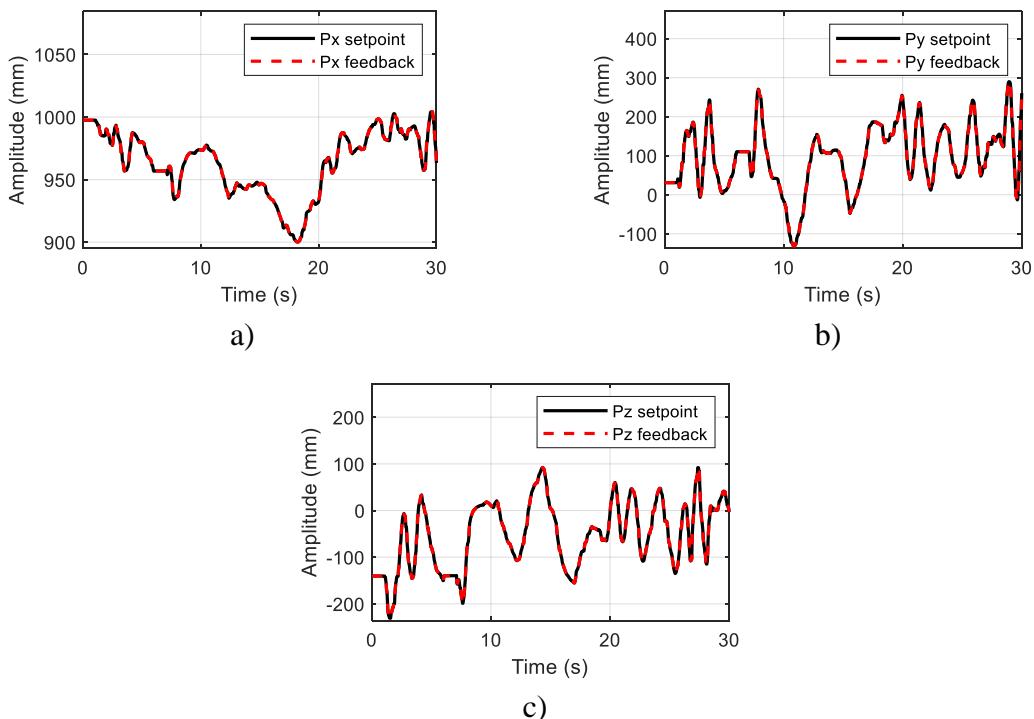
Trường hợp 1: $k = \text{diag}([2.5 \ 5 \ 5])$; $\mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$.

Thực hiện thí nghiệm trên ta thu được các kết quả như sau:

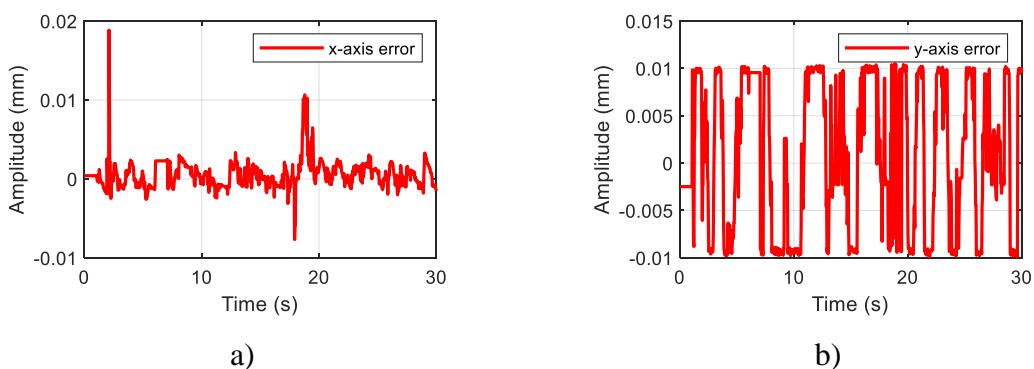
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

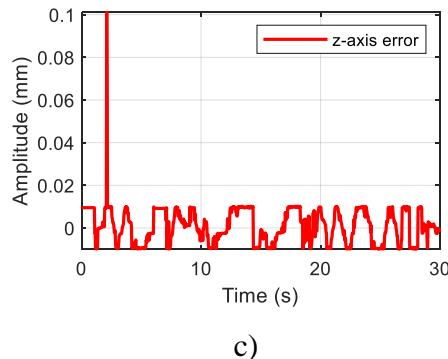


Hình 5.24: Quỹ đạo chuyển động của robot khi mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 1 a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ



Hình 5.25 Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 1



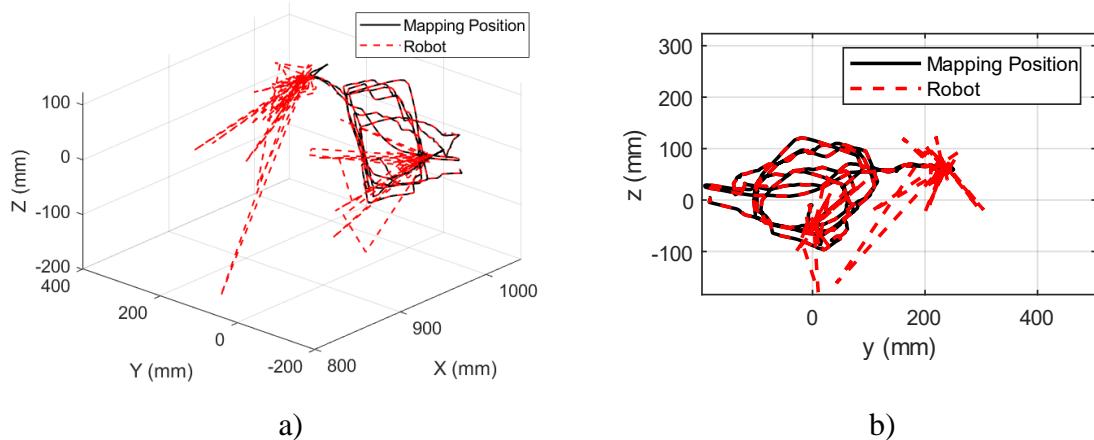


c)

Hình 5.26: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 1

Trường hợp 2: $k = \text{diag}([3 \ 6 \ 6])$; $\mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$.

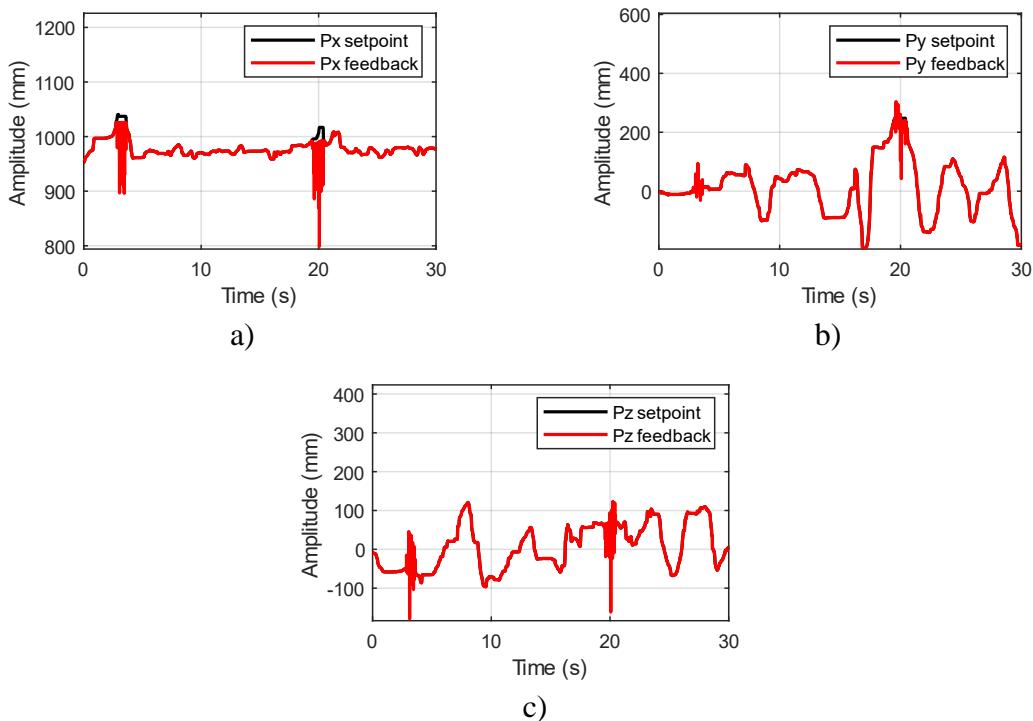
Thực hiện thí nghiệm trên ta thu được các kết quả như sau:



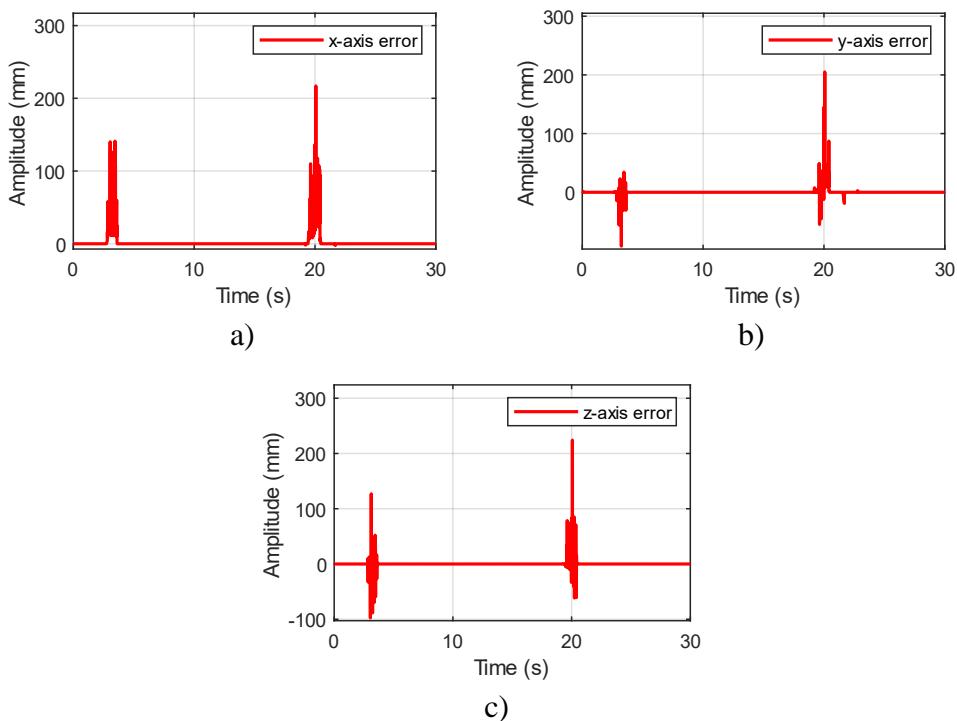
Hình 5.27: Quỹ đạo chuyển động của robot khi mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 2; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

Khi tiến hành mô phỏng cho ta thấy được hạn chế của việc chọn vùng không gian làm việc chung khi xét ở robot cáp thì phải nằm bên trong vùng làm việc của robot cáp nếu có vùng làm việc ở bên ngoài thì vùng này bây giờ sẽ chứa các điểm kỳ dị. Robot sẽ di chuyển mất kiểm soát khi vào những vùng này. Đây cũng là hạn chế khi áp dụng giải thuật Jacobian tính toán động học nghịch cho robot. Để khắc phục vấn đề trên có rất nhiều phương pháp được áp dụng trong việc né điểm kỳ dị khi dùng giải thuật Jacobian. Ở nhóm đề xuất phương pháp phản hồi lực tác dụng lên Joystick để giữ cho việc điều khiển robot cáp không di chuyển ra bên ngoài biên vùng không gian làm việc.

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG



Hình 5.28 Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 2

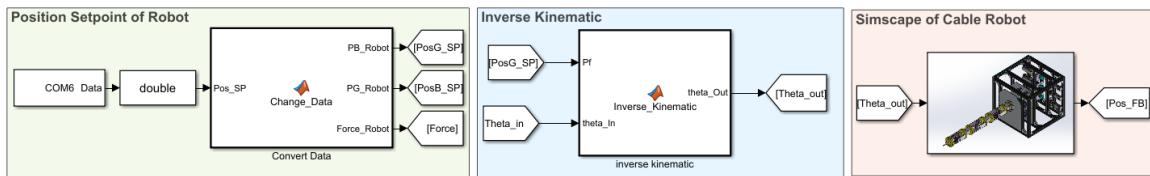


Hình 5.29 Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực trường hợp 2

Kết quả trên cho thấy rằng tại thời điểm robot di chuyển đến điểm kỳ dị thì robot di chuyển mất kiểm soát dao động cực kỳ nhanh tại thời điểm này. Sai số vị trí theo trục x, y và z lên tới hơn 200mm so với tín hiệu đặt.

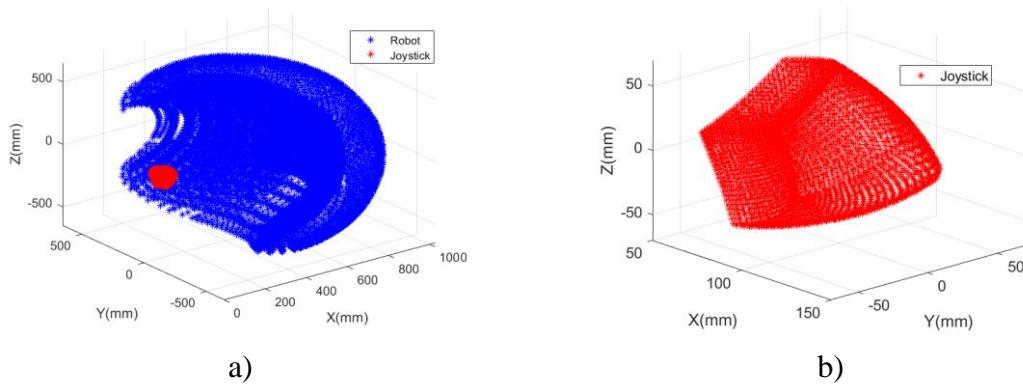
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

5.6 Mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực



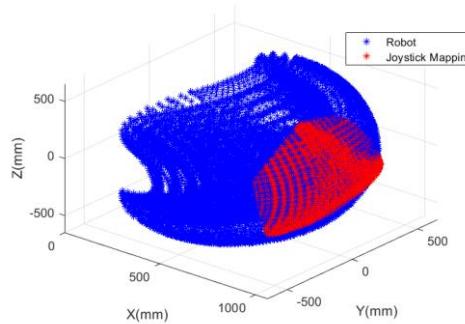
Hình 5.30: Sơ đồ khái mô phỏng phản hồi lực

Điều khiển robot di chuyển theo quỹ đạo của thiết bị joystick tạo ra, vùng không gian bấy giờ được chọn là việc ánh xạ giữa 2 vùng không gian làm việc với nhau. Hình 5.31 biểu thị cho không gian làm việc của robot cáp và không gian làm việc của thiết bị điều khiển joystick trước khi ánh xạ. Sau khi áp dụng phương pháp ánh xạ không gian làm việc, không gian làm việc của joystick đã được đồng bộ với robot cáp.



Hình 5.31: Không gian làm việc của hai robot; a) của robot cáp và joystick trước khi ánh xạ; b) của joystick sau khi ánh xạ

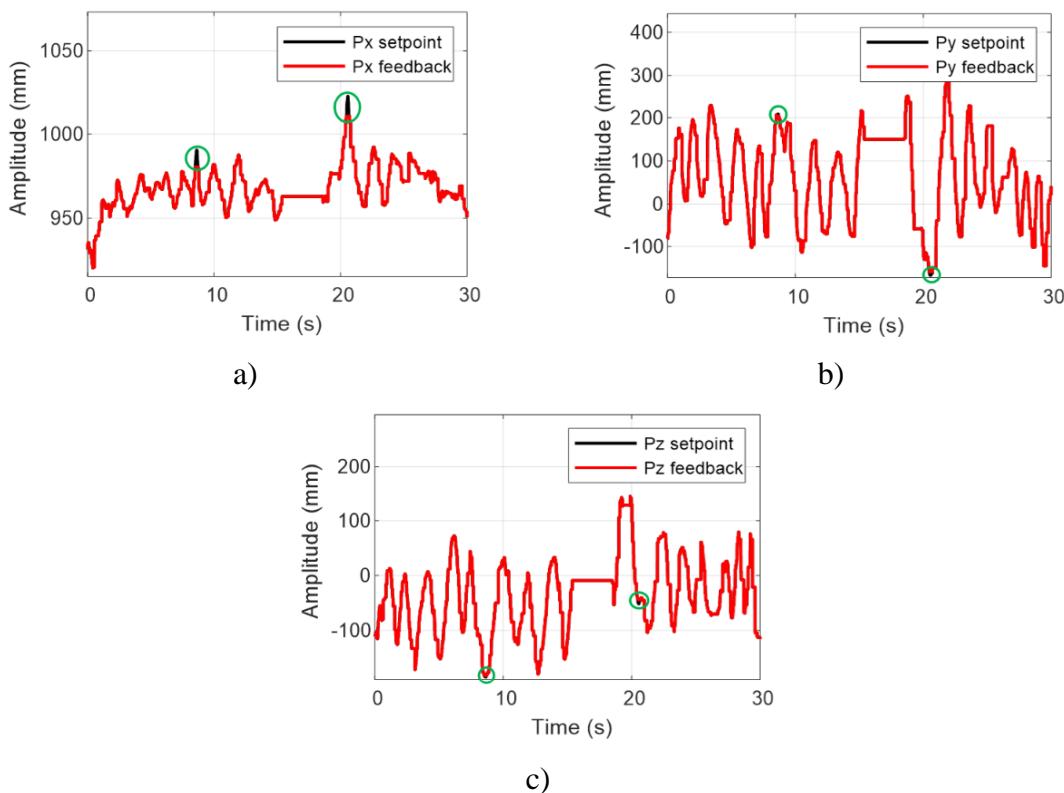
Với các hệ số đã chọn như công thức số (2.25) với hệ số là $k = diag([3 \ 6 \ 6])$ và $\mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$ ta có vùng giao giữa 2 không gian làm việc của robot như sau:



Hình 5.32: Không gian làm việc chung của 2 robot sau phép ánh xạ

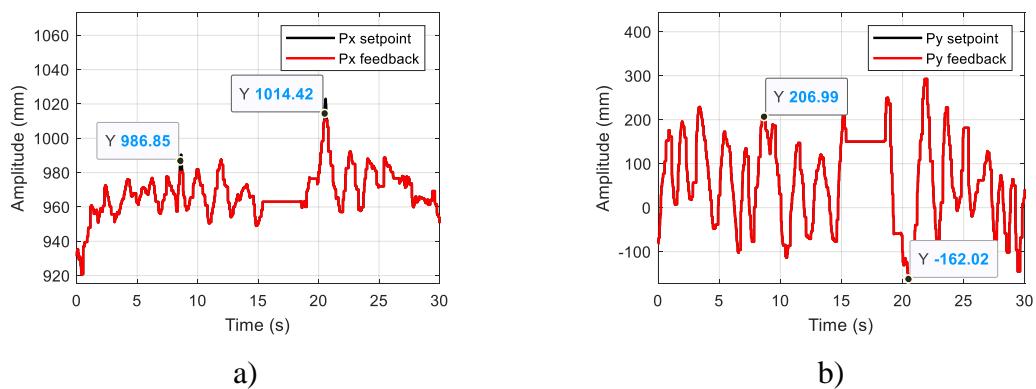
Thực hiện thí nghiệm trên ta thu được các kết quả như sau:

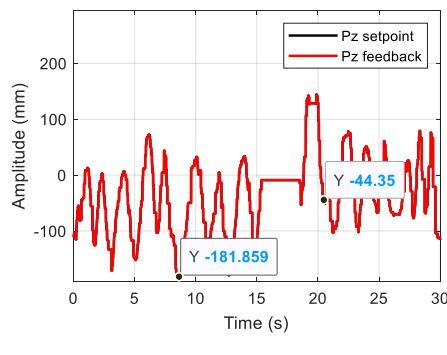
CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG



Hình 5.33: Tín hiệu vị trí đặt của robot theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực

Khi joystick di chuyển bên trong vùng không gian làm việc chung của cả 2 robot, tín hiệu vị trí từ joystick sẽ được ánh xạ trực tiếp sang không gian làm việc của robot cáp. Tuy nhiên, khi joystick di chuyển ra ngoài không gian làm việc chung của cả 2 robot, robot cáp sẽ nhận tín hiệu vị trí gần nhất còn nằm trong vùng không gian làm việc chung của 2 robot làm tín hiệu đặt. Các vị trí được khoanh tròn trên hình biểu thị cho trạng thái vị trí đặt đã nằm bên ngoài không gian làm việc của robot.

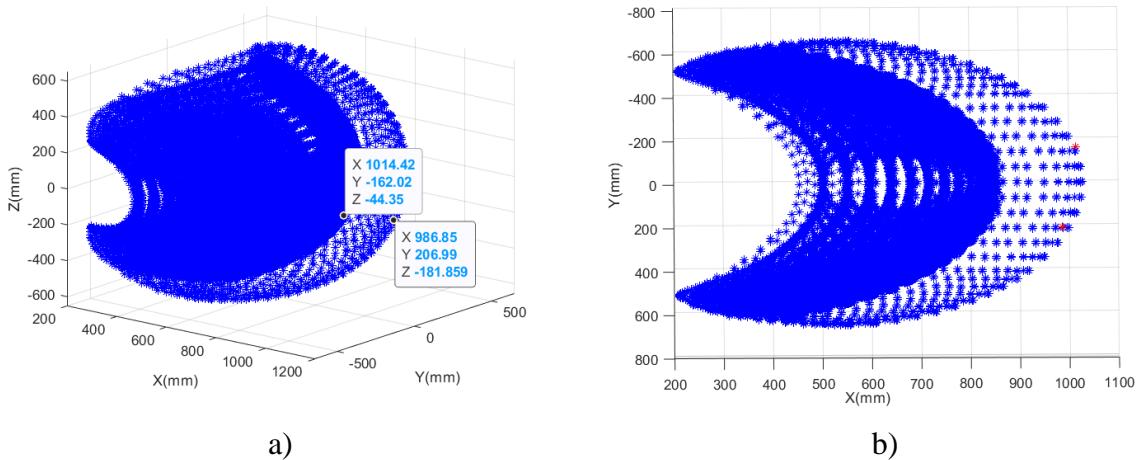




c)

Hình 5.34: Toạ độ vị trí robot di chuyển ra bên ngoài vùng làm việc; a) trục x; b) trục y; c) trục z

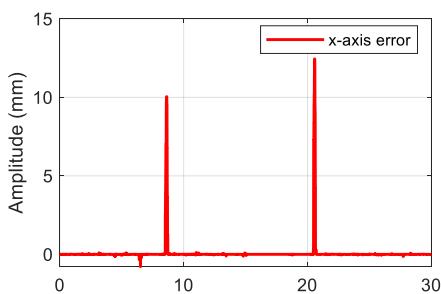
Trong thí nghiệm trên, có 2 điểm nằm ngoài không gian làm việc, lần lượt gọi tên 2 điểm này là P_1 và P_2 , với toạ độ lần lượt là $P_1 = (986.85; 206.99; -181.859)$ và $P_2 = (1014.42; -162.02; -44.35)$. Ta có thấy 2 điểm này nằm ngoài không gian làm việc chung của robot cáp và joystick như trong hình dưới đây:



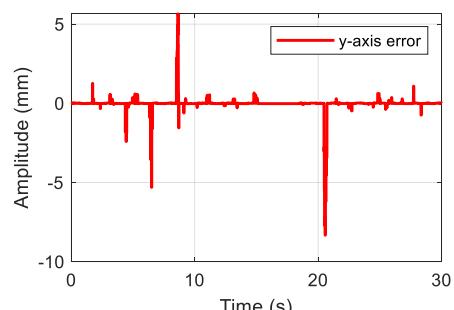
a)

b)

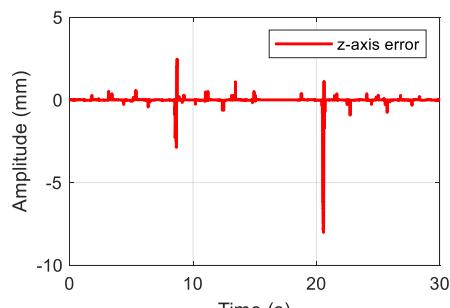
Hình 5.35: Vị trí điểm nằm ngoài vùng không gian làm việc của robot khi chạy trên mô phỏng



a)



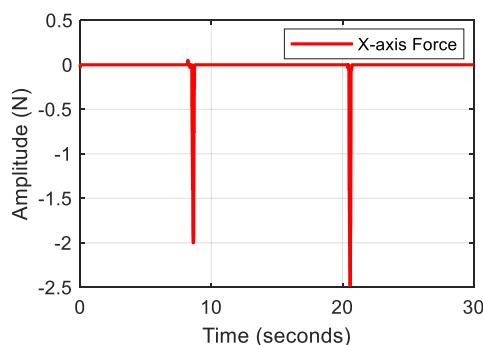
b)



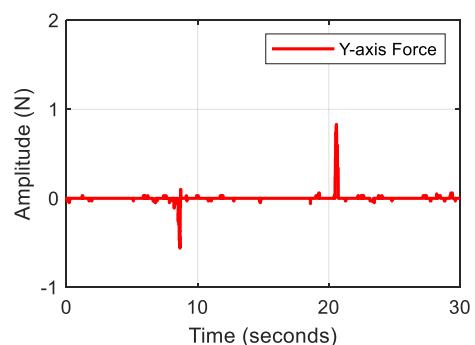
e)

Hình 5.36 Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực

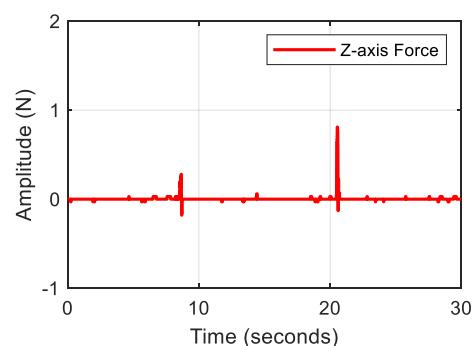
Dựa công thức (2.28), tại thời điểm vị trí của joystick sau khi ánh xạ và nằm ngoài không gian làm việc chung của cả 2 robot, ta có thể tính toán được lực phản hồi tác động lên joystick theo 3 phương x, y và z có độ lớn như Hình 5.37 để người vận hành có thể cảm nhận được điểm ngoài không gian làm và đưa robot về lại không gian làm việc của robot.



a)



b)



e)

Hình 5.37 Tín hiệu lực tác động theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực

Từ những kết quả mô phỏng trong mục 5.5 và 5.6 ta rút ra được bảng kết luận sau:

CHƯƠNG 5: MÔ PHỎNG HỆ THỐNG

Bảng 5.4: So sánh kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có và không có phản hồi lực

Không có phản hồi lực		Có phản hồi lực
Trường hợp 1	Trường hợp 2	
$\mathbf{k} = diag([2.5 \ 3 \ 3])$ $\mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$	$\mathbf{k} = diag([3 \ 6 \ 6])$ $\mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$	$\mathbf{k} = diag([3 \ 6 \ 6])$ $\mathbf{P}_w = [650 \ 0 \ 0]^T$
Hệ số khuếch đại nhỏ, làm cho vùng không gian làm việc chung của 2 robot nhỏ. Vùng không gian làm việc chung chỉ được nằm trong vùng không gian mà chúng ta chọn ở đây là một khối hình hộp chữ nhật.	Hệ số khuếch đại lớn, làm cho vùng không gian làm việc chung của 2 robot được mở rộng, nhưng sẽ có những vị trí nằm ngoài không làm việc của robot cáp và làm robot di chuyển bất ổn định	Hệ số khuếch đại lớn, làm cho vùng không gian làm việc chung của 2 robot được mở rộng, nhờ phản hồi lực tác động lên Joystick mà robot cáp được điều khiển di chuyển ổn định bên trong vùng không gian làm việc chung của 2 robot mà không chạm phải điểm kỳ dị. Đồng thời tạo cảm nhận xúc giác cho người vận hành biết và cảm nhận trong việc điều khiển robot.

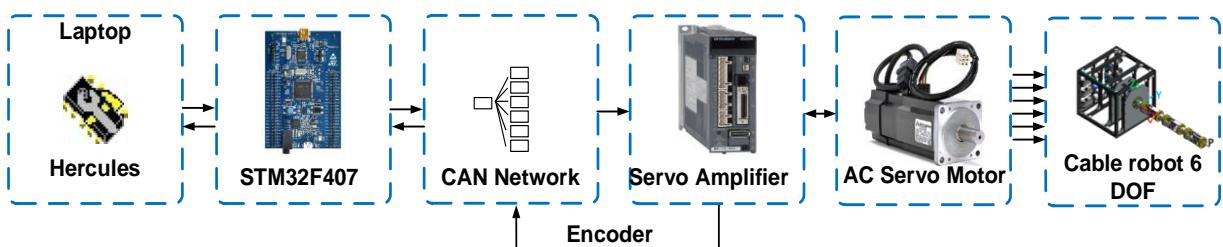
CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Trong chương này, nhóm tiến hành thực nghiệm và đánh giá mạng CAN đã xây dựng để đảm yêu cầu của hệ thống, đánh giá tính đúng đắn và khả thi của giải thuật Jacobian khi robot hoạt động trong thực tế. Bên cạnh đó, nhóm cũng sẽ tiến hành đánh giá phương pháp điều khiển robot cáp từ xa với cả 2 trường hợp là có và không có phản hồi lực. Sau cùng là kết luận và rút ra hiệu quả của phương pháp điều khiển từ xa có phản hồi lực.

6.1 Thực nghiệm mạng truyền thông CAN

Để vận hành được mô hình robot, hệ thống mạng CAN nhóm đã xây dựng cần phải có tính chính xác cao, đảm bảo được độ tin và ổn định khi hoạt động.

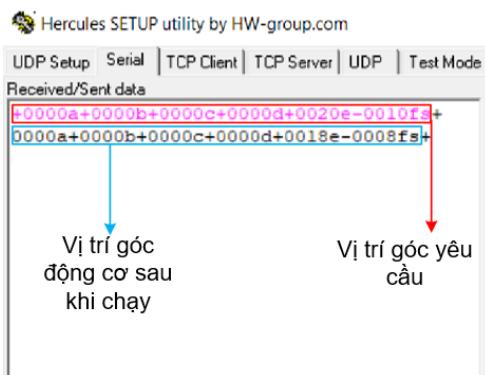
Sau khi cấu hình, xây dựng và lập trình mạng CAN bus, nhóm sẽ tiến hành kiểm tra truyền nhận dữ liệu và điều khiển đơn giản trên thực tế với động cơ AC Servo. Sơ đồ tổng quan thực nghiệm kiểm tra tính đúng đắn của mạng CAN được mô tả như sau:



Hình 6.1: Sơ đồ tổng quan thực nghiệm kiểm chứng mạng CAN

Theo cấu trúc dữ liệu đã xây dựng cho mạng CAN, dữ liệu gửi từ máy tính là vị trí góc quay của động cơ AC Servo. Nhóm tiến hành một vài thí nghiệm để kiểm tra như sau:

Thí nghiệm 1: điều khiển động cơ số 5 quay một góc 0.2 deg, động cơ số 6 quay một góc -0.1 deg.



Hình 6.2: Kết quả kiểm chứng mạng CAN thí nghiệm 1

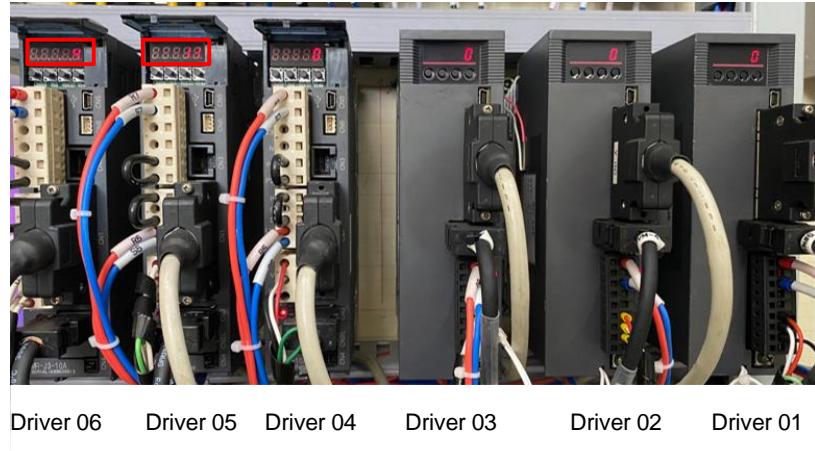
Theo kết quả trên Hình 6.2, tín hiệu cần gửi xuống cho động cơ 5 là $+0.2 \times 1000 = +0020$, tín hiệu gửi xuống cho động cơ 6 là $-0.1 \times 100 = -0010$. Tín hiệu

CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

hồi tiếp đọc được từ encoder của động cơ AC đối với động cơ 5 là $\frac{+0018}{100} = 0.18\text{deg}$, vì

trí động cơ 6 là $\frac{-0008}{100} = -0.08\text{deg}$

Vị trí động cơ có sai số so với tín hiệu đặt, quan sát xung cung cấp cho động cơ và số xung trên driver đã nhận được.



Hình 6.3: Số xung nhận được trên driver thí nghiệm 1

Dựa vào vị trí góc của động cơ, số xung mỗi vòng xoay của động cơ, tỉ số truyền của hộp số ta có thể tính được số xung cần phát của mỗi động cơ bằng công thức sau:

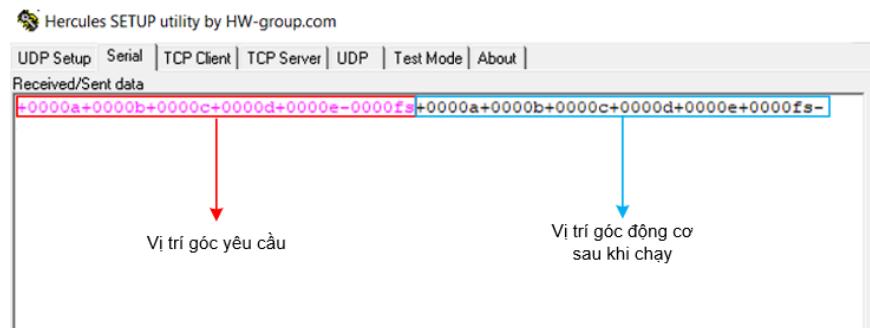
$$p_i = \frac{\theta_i r_i a_i}{360} \quad (5.1)$$

Trong đó p_i là số xung cần phát của động cơ thứ i , θ_i là góc xoay của động cơ thứ i , r_i là số xung mỗi vòng xoay của động cơ thứ i và a_i là tỉ số truyền của hộp số động cơ thứ i .

Áp dụng công thức (5.1), ta có thể tính được số xung cần phát của động cơ 5 và động cơ 6 như sau lần lượt là $p_5 \approx 11$ xung và $p_6 \approx -4$ xung.

So sánh số xung trên lý thuyết tính được và số xung trên driver của động cơ, kết quả cho thấy đã cung cấp đủ xung, sai số tín hiệu do làm tròn xung cần cấp. Do đó cần tích lũy để bù xung cung cấp cho driver.

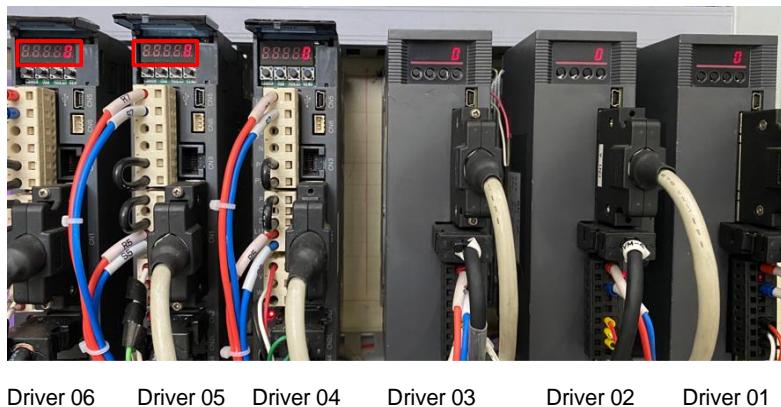
Thí nghiệm 2: điều khiển động cơ số 5 và số 6 về vị trí góc 0 deg



Hình 6.4: Kết quả kiểm chứng mạng CAN thí nghiệm 2

CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Tín hiệu đặt gửi cho động cơ là vị trí 0 deg. Dựa vào kết quả trên Hình 6.4, vị trí của động cơ đều đã chạy về vị trí 0 deg.

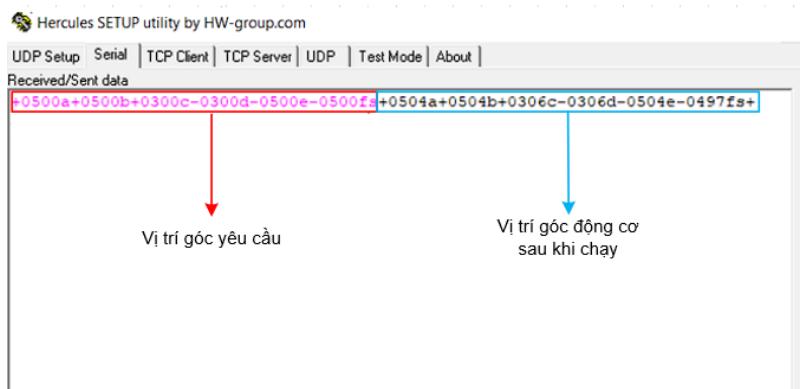


Hình 6.5: Số xung nhận được trên driver thí nghiệm 2

Quan sát số xung trên driver của động cơ, số xung cung cấp để động cơ 5 và 6 quay ngược về vị trí 0 deg có nghĩa là số xung sẽ trở về vị trí ban đầu là 0 xung.

Thí nghiệm 3: điều khiển vị trí cả 6 động cơ cùng lúc

Thực hiện điều khiển vị trí động cơ theo thứ tự lần lượt là $\theta_1 = 5$; $\theta_2 = 5$; $\theta_3 = 3$; $\theta_4 = -3$; $\theta_5 = -5$; $\theta_6 = -5$ (deg)



Hình 6.6: Kết quả kiểm chứng mạng CAN thí nghiệm 2

Dựa vào tín hiệu hồi tiếp của 6 động cơ, vị trí góc của từng động cơ là:

Bảng 6.1: Vị trí góc của động cơ trong thí nghiệm 3

Động cơ i	Vị trí góc (deg) θ_i
1	$+0504 / 100 = 5.04$
2	$+0504 / 100 = 5.04$
3	$+0306 / 100 = 3.06$
4	$-0306 / 100 = -3.06$
5	$-0504 / 100 = -5.04$
6	$-0497 / 100 = -4.97$



Hình 6.7: Số xung nhận được trên driver thí nghiệm 3

Dựa vào công thức (5.1) ta có số xung cần phát của mỗi động cơ như sau:

Bảng 6.2: Số xung cần phát của động cơ trong thí nghiệm 3

Động cơ i	Số xung cần phát p_i (xung)
1	277
2	277
3	166
4	-166
5	-277
6	-208

Dấu trừ biểu thị chiều quay của động cơ cùng chiều kim đồng hồ. Vị trí của động cơ gần bằng vị trí tín hiệu đặt, sai số nhỏ do làm tròn xung và độ phân giải xung encoder do giới hạn đọc xung encoder của vi điều khiển.

Kết luận: mạng CAN điều khiển hoạt động đúng theo yêu cầu thuật toán đã đề ra, xung cung cấp cho các driver hoạt động chính xác.

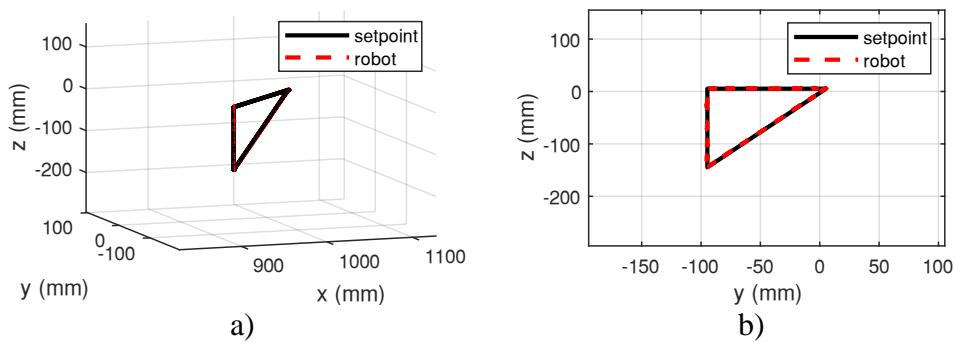
6.2 Quy hoạch quỹ đạo cho robot trong thực tế

6.2.1 Quy hoạch quỹ đạo hình tam giác

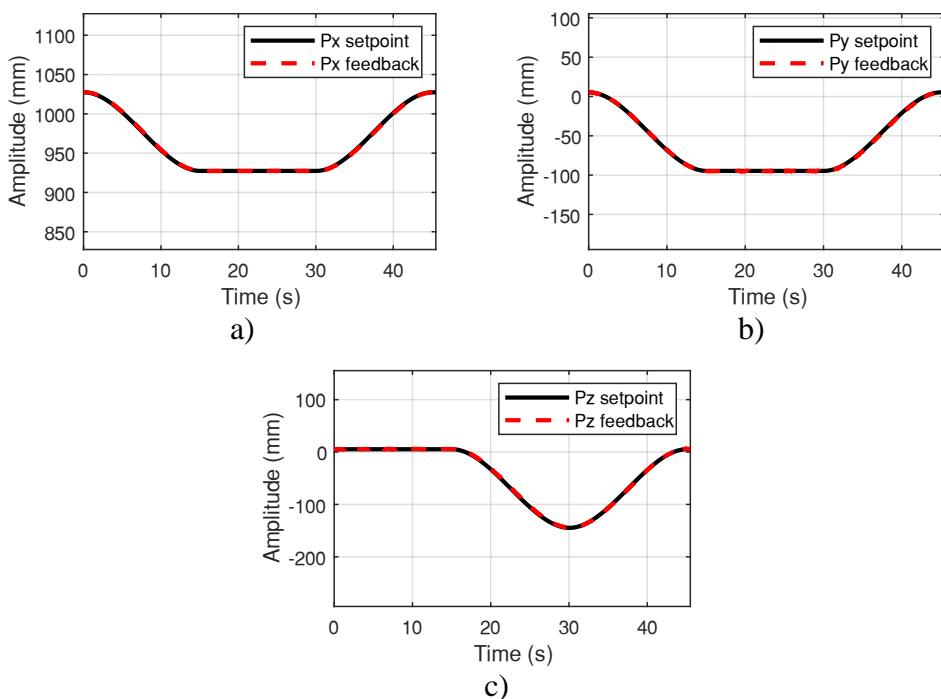
Quy hoạch quỹ đạo hình tam giác cho robot đi qua lần lượt các điểm như sau: điểm đầu tiên là vị trí ban đầu của robot $A(1027.4; -5.3; -5.3)$. Robot lần lượt đi qua điểm $B(927.4; -105.3; -5.3)$, điểm $C(927.4; -105.3; -155.3)$ và sau đó trở về điểm A. Hàm quy hoạch quỹ đạo được sử dụng là hàm bậc 3, thời gian di chuyển giữa 2 điểm là 15s, thời gian lấy mẫu của hệ thống là 50ms.

Kết quả thực nghiệm trên mô hình robot với tín hiệu hồi tiếp từ động cơ AC Servo thể hiện theo các hình bên dưới đây.

CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

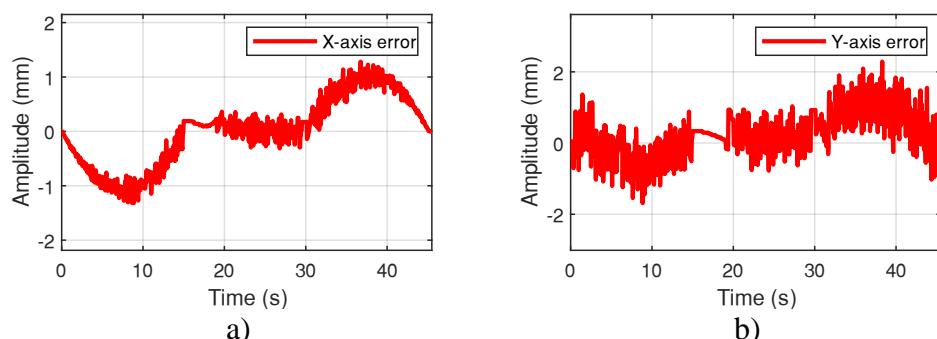


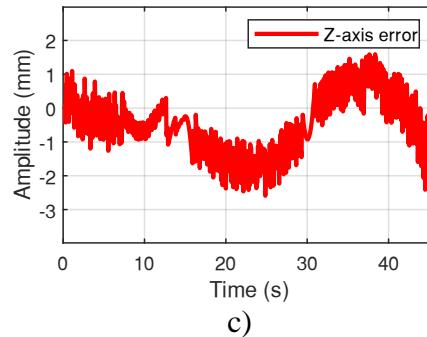
Hình 6.8: a) Quỹ đạo tam giác trong mặt phẳng XYZ; b) quỹ đạo tam giác trong mặt phẳng YOZ



Hình 6.9: Vị trí robot khi quy hoạch quỹ đạo tam giác a) vị trí theo trục X; b) vị trí theo trục Y; c) vị trí theo trục Z

Theo tín hiệu vị trí các trục của robot, vị trí robot bám theo tín hiệu đặt đã gửi. Ngoài ra để đánh giá thêm độ chính xác, cần quan sát thêm sai số tín hiệu vị trí của robot. Sai số các trục được thể hiện như Hình 6.10.

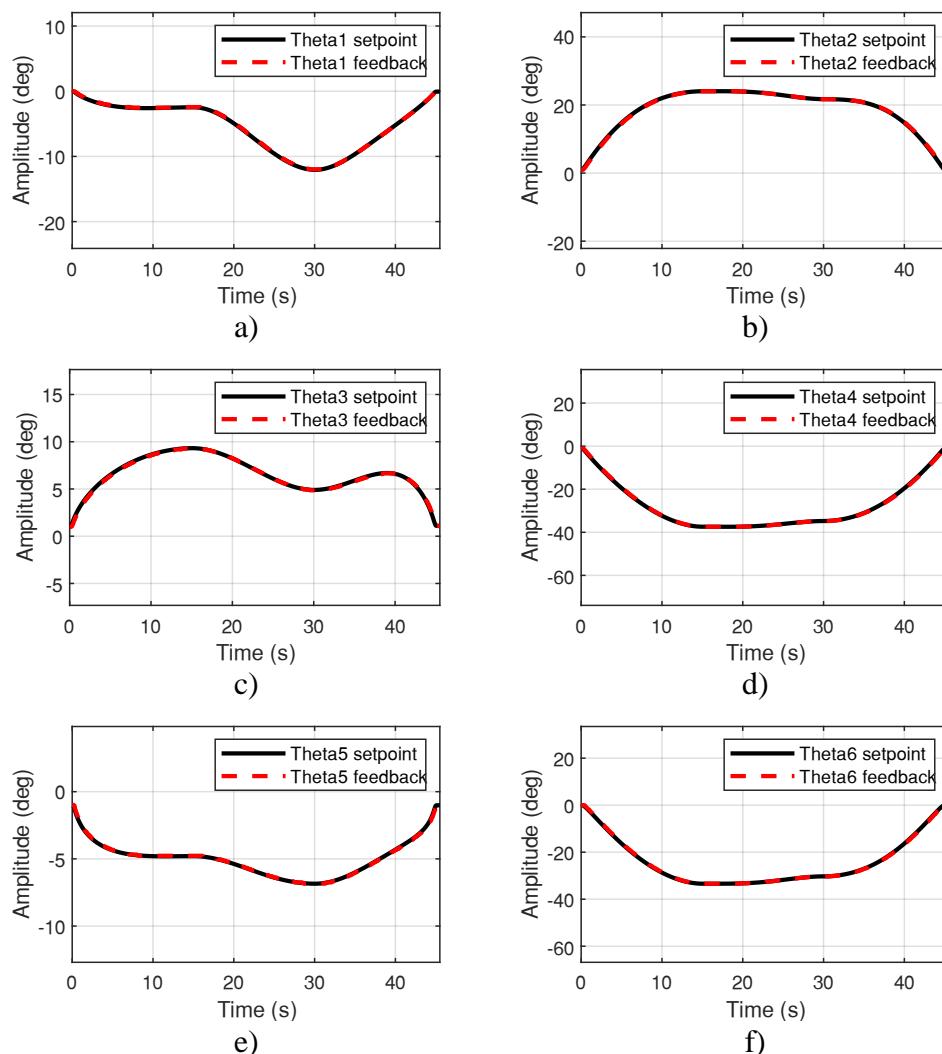




Hình 6.10: Sai số quy hoạch quỹ đạo hình tam giác vị trí của robot a) sai số theo trục X; b) sai số theo trục Y; c) sai số theo trục Z

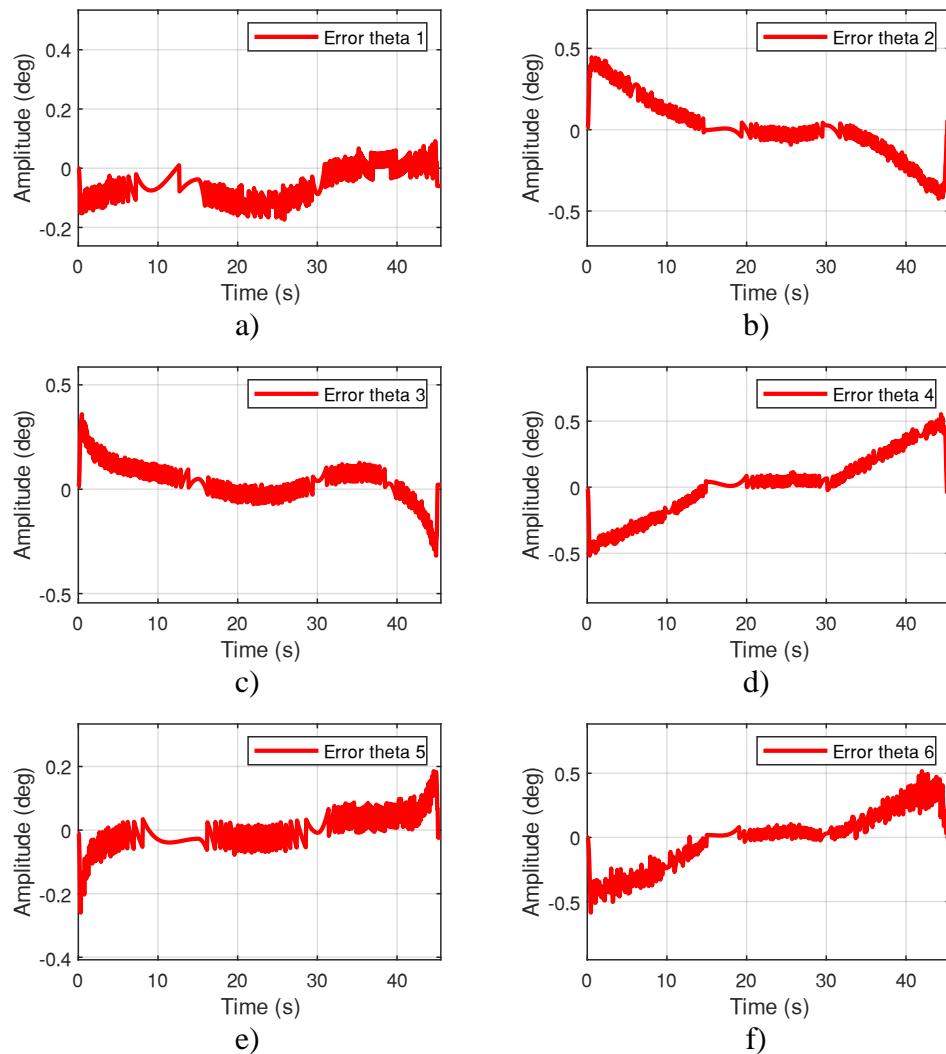
Quan sát sai số vị trí của robot như Hình 6.10, sai số giữa tín hiệu đặt và tín hiệu hồi tiếp của robot nhỏ khoảng dưới 2mm.

Đáp ứng các góc của robot theo thời gian được thể hiện như Hình 6.11:



Hình 6.11: Đáp ứng góc quy hoạch quỹ đạo hình tam giác của robot a) góc theta1; b) góc theta2; c) góc theta3; d) góc theta4; e) góc theta5; f) góc theta6

Quan sát đáp ứng các góc của robot, tín hiệu hồi tiếp từ encoder các động cơ bám theo tín hiệu đặt.



Hình 6.12: Đáp ứng sai số góc quy hoạch quỹ đạo hình tam giác a) sai số góc theta1; b) sai số góc theta2; c) sai số góc theta3; d) sai số góc theta4; e) sai số góc theta5; f) sai số góc theta6

Sai số các khớp của robot nhỏ khoảng dưới 0.5 deg, tín hiệu các góc đáp ứng tương ứng tốt với tín hiệu đặt. Tuy nhiên cần thực hiện thí nghiệm thêm để có kết quả tốt hơn. Thí nghiệm được thực hiện 10 lần với tín hiệu quỹ đạo không đổi. Kết quả sai số vị trí của robot được thống kê theo Bảng 6.3.

Bảng 6.3: Giá trị RMS với quỹ đạo hình tam giác

STT	RMS Motor (mm)		
	X	Y	Z
1	0.5262	0.8562	0.8720
2	0.4989	0.6997	0.9212
3	0.4994	0.6995	0.9279
4	0.5040	0.7200	0.9380
5	0.5016	0.6979	0.9740
6	0.5128	0.7482	0.8743
7	0.5304	0.9582	0.8481

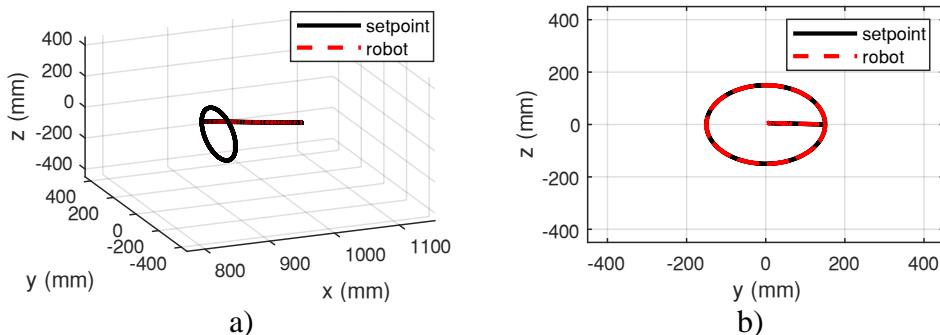
8	0.5201	1.0081	0.9117
9	0.5307	0.9444	1.1269
10	0.6305	0.6845	0.9990

Sau khi thực hiện thí nghiệm nhiều lần, kết quả cho thấy sai số vị trí từ tín hiệu đọc được từ encoder trên động cơ AC Servo tốt hơn so với vị trí được tính dựa trên tín hiệu encoder từ khớp của mô hình robot. Sai số vị trí từ tín hiệu encoder từ động cơ lớn nhất khoảng 0.63mm theo trục X, 1mm theo trục Y và 1.3mm theo trục Z.

Kết luận: Sau khi thực hiện quy hoạch quỹ đạo cho robot, động cơ quay tương đối chính xác các góc tín hiệu mong muốn với sai số nhỏ. Tuy nhiên trên thực tế, mô hình chuyển động còn bị hạn chế, do đó các khớp chuyển động thông qua cáp chưa được chính xác.

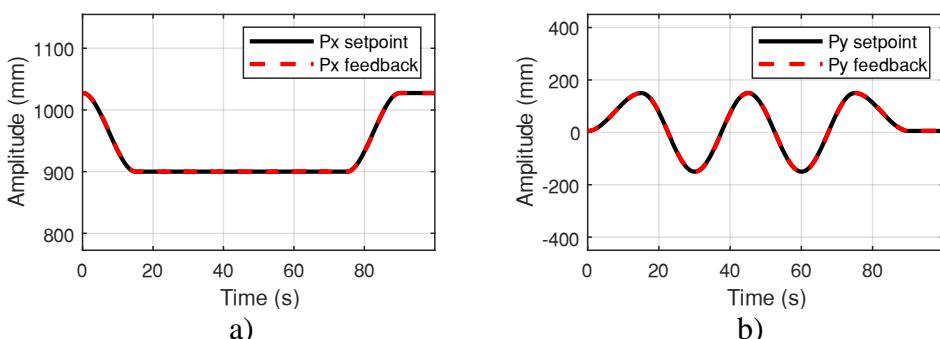
6.2.2 Quy hoạch quỹ đạo hình tròn

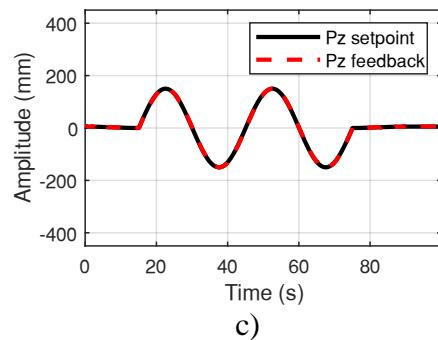
Thực nghiệm quỹ đạo hình tròn tâm $O(900;0;0)$ có bán kính 15cm. Robot sẽ xuất phát tại vị trí home $A(1027.4;-5.3;-5.3)$ sau đó di chuyển đến điểm đầu tiên của quỹ đạo tròn và bắt đầu vẽ, quá trình sẽ kết thúc sau 2 chu kỳ đường tròn và robot sẽ di chuyển lại về home. Thời gian di chuyển hết một vòng tròn là 30.1s, thời gian di chuyển từ điểm home A đến vị trí của đường tròn là 15s, thời gian lấy mẫu của hệ thống là 50ms.



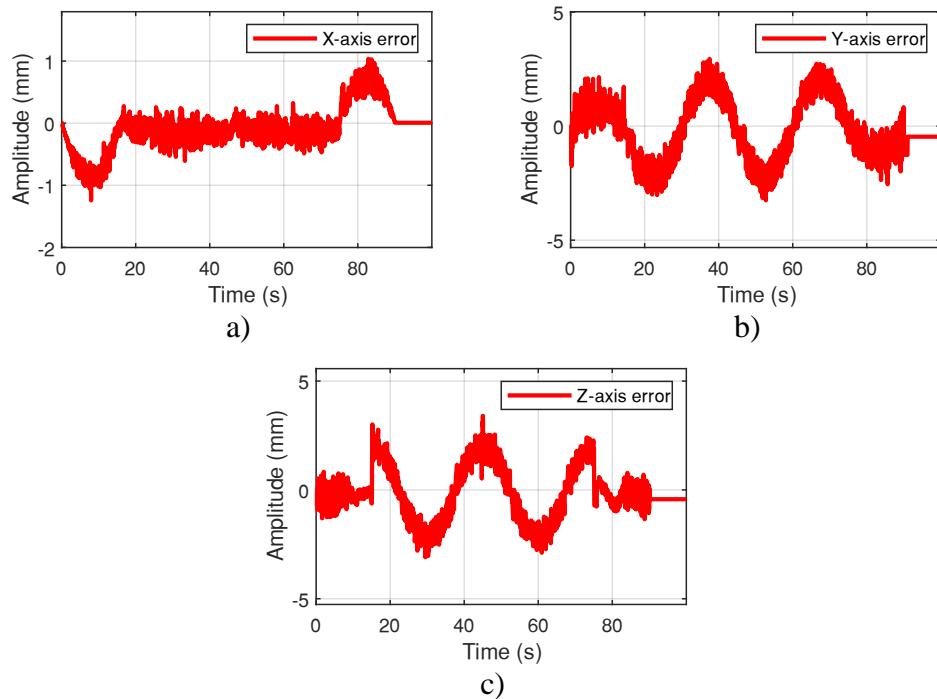
Hình 6.13: a) Quỹ đạo hình tròn trong mặt phẳng XYZ; b) quỹ đạo hình tròn trong mặt phẳng YOZ

Quan sát vị trí của robot như Hình 6.13, robot bám theo tín hiệu đặt là hình tròn, đường tín hiệu màu đen là tín hiệu đặt và đường màu đỏ là tín hiệu encoder hồi tiếp từ động cơ.



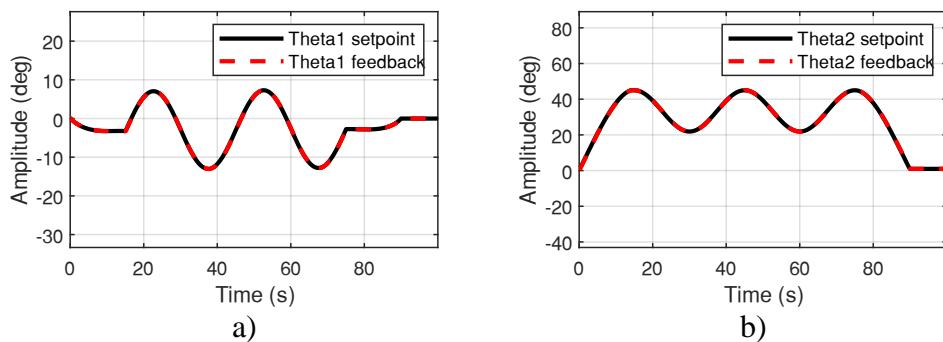


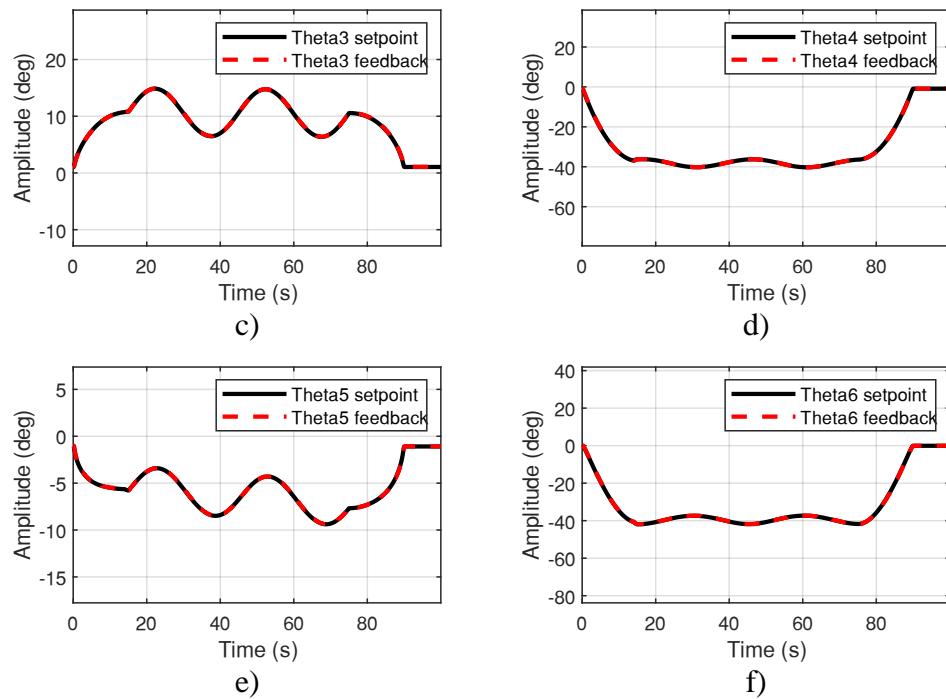
Hình 6.14: Đáp ứng vị trí quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) vị trí theo trục X; b) vị trí theo trục Y; c) vị trí theo trục Z



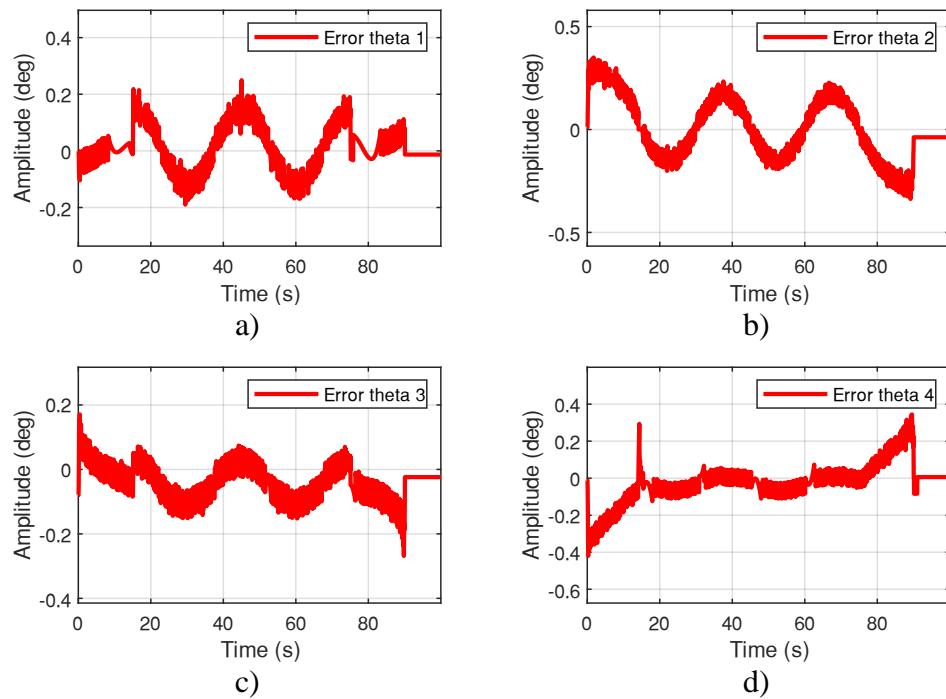
Hình 6.15: Đáp ứng sai số quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) sai số theo trục X; b) sai số theo trục Y; c) sai số theo trục Z

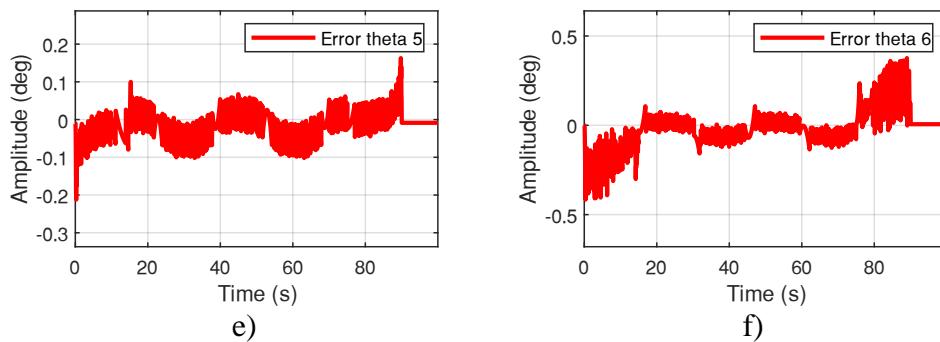
Theo kết quả dữ liệu thu thập được như Hình 6.14 và Hình 6.15, vị trí của robot bám theo tín hiệu đặt khá tốt, với sai số nhỏ theo các trục. Sai số nhỏ khoảng dưới 3mm.





Hình 6.16: Đáp ứng góc của robot khi quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) góc θ_1 ; b) góc θ_2 ; c) góc θ_3 ; d) góc θ_4 ; e) góc θ_5 ; f) góc θ_6





Hình 6.17: Đáp ứng sai các khớp khi quy hoạch quỹ đạo hình tròn a) sai số khớp 1; b) sai số khớp 2; c) sai số khớp 3; d) sai số khớp 4; e) sai số khớp 5; f) sai số khớp 6

Theo dữ liệu vị trí và sai số các khớp đã thu thập được từ mô hình thực tế, vị trí các khớp của robot đáp ứng tốt bám theo tín hiệu đặt, sai số các khớp nhỏ dưới 0.5 deg. Để đánh giá thêm về phương pháp Jacobian trong quy hoạch quỹ đạo hình tròn và độ chính xác của mô hình. Thí nghiệm được thực hiện thêm 10 lần để kiểm chứng đánh giá.

Bảng 6.4: Giá trị RMS với quỹ đạo hình tròn

STT	RMS Motor (mm)		
	X	Y	Z
1	0.5297	1.9050	1.3233
2	0.3929	1.3760	1.3006
3	0.3631	1.3601	1.2172
4	0.3661	1.3751	1.2294
5	0.3666	1.3820	1.2281
6	0.3646	1.3748	1.2339
7	0.3688	1.3783	1.2229
8	0.3656	1.3926	1.2664
9	0.3652	1.3744	1.2281
10	0.3668	1.3882	1.2284

Dựa vào kết quả thu thập được từ các cảm biến encoder trên mô hình, vị trí của robot được tính dựa trên tín hiệu encoder từ động cơ AC Servo có kết quả tốt. Sai số vị trí tính toán được từ tín hiệu encoder của động cơ có sai số nhỏ dưới 0.5mm với trục X, 1.9 mm với trục Y và 1.3 mm với trục Z. Tuy nhiên thực tế robot chuyển động theo tín hiệu đọc được trực tiếp từ encoder từ mỗi khớp, sai số vị trí lớn và không bám theo quỹ đạo mong muốn.

Nguyên nhân dẫn đến mô hình bị chuyển động sai:

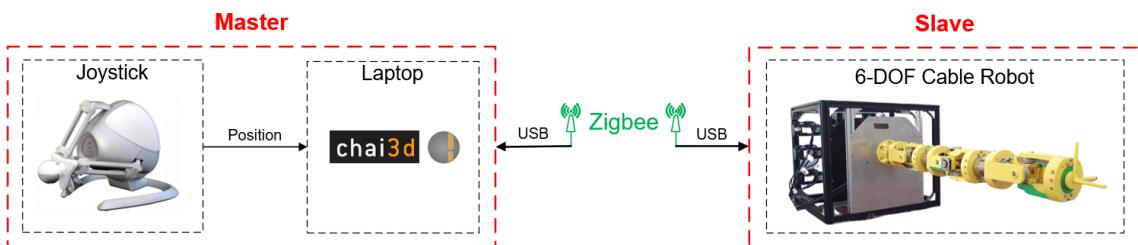
- Sự chuyển động của mỗi sợi cáp còn hạn chế
- Lực căng giữa các sợi cáp chưa đều đẫn đến các khớp chuyển động chưa đúng

CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

- Xảy ra hiện tượng cáp bị giãn trong lúc di chuyển

Kết luận: qua kết quả khảo sát thu thập dữ liệu từ mô hình thực nghiệm, phương pháp Jacobian trong giải động học nghịch cho robot cáp 6 bậc tự do có hiệu quả tốt. Tín hiệu encoder trên động cơ AC Servo được sử dụng để đánh giá hệ thống đã xây dựng. So sánh kết quả thực nghiệm với mô phỏng trong cùng trường hợp, mô hình thực tế đáp ứng khá tốt tương đồng với kết quả đã mô phỏng, sai số vị trí nhỏ.

6.3 Thực nghiệm điều khiển từ xa cho robot không có phản hồi lực



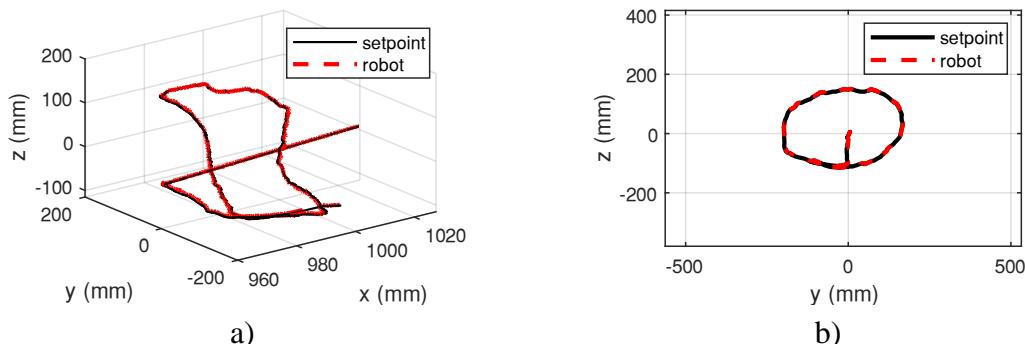
Hình 6.18: Tổng quan thực nghiệm điều khiển từ xa không có phản hồi lực

Ở trường hợp không có phản hồi lực ta thấy rằng Joystick chỉ gửi tín hiệu vị trí. Laptop tiến hành đọc dữ liệu xử lý ánh xạ qua miền không gian làm việc chung để điều khiển robot cáp 6 bậc tự do ở Slave. Ban đầu ta sẽ tiến hành thiết lập vị trí gốc chung của Joystick và robot cáp 6 bậc tự do. Thời gian di chuyển từ vị trí gốc của robot cáp có vị trí là $P(1027.5; 0; 0)$ đến vị trí lúc Joystick gửi lần đầu tiên trong vòng 15s. Khi hai robot đều cùng ở vị trí gốc trong không gian ánh xạ thì ta bắt đầu cho Joystick di chuyển theo những quỹ đạo mà ta mong muốn.

Thực nghiệm hệ thống điều khiển xa với thời gian thực hiện trong vòng 60s ta tiến hành thu thập dữ liệu vị trí đặt, góc quay của robot.

Ta có các hệ số được chọn như sau: $\mathbf{k} = diag([2.5 \ 4 \ 4])$; $\mathbf{P}_w = [680 \ 0 \ 0]^T$ để đảm bảo sự an toàn trong quá trình vận hành nên ta chọn vùng làm việc chung của hai robot có hệ số nhỏ hơn so với mô phỏng.

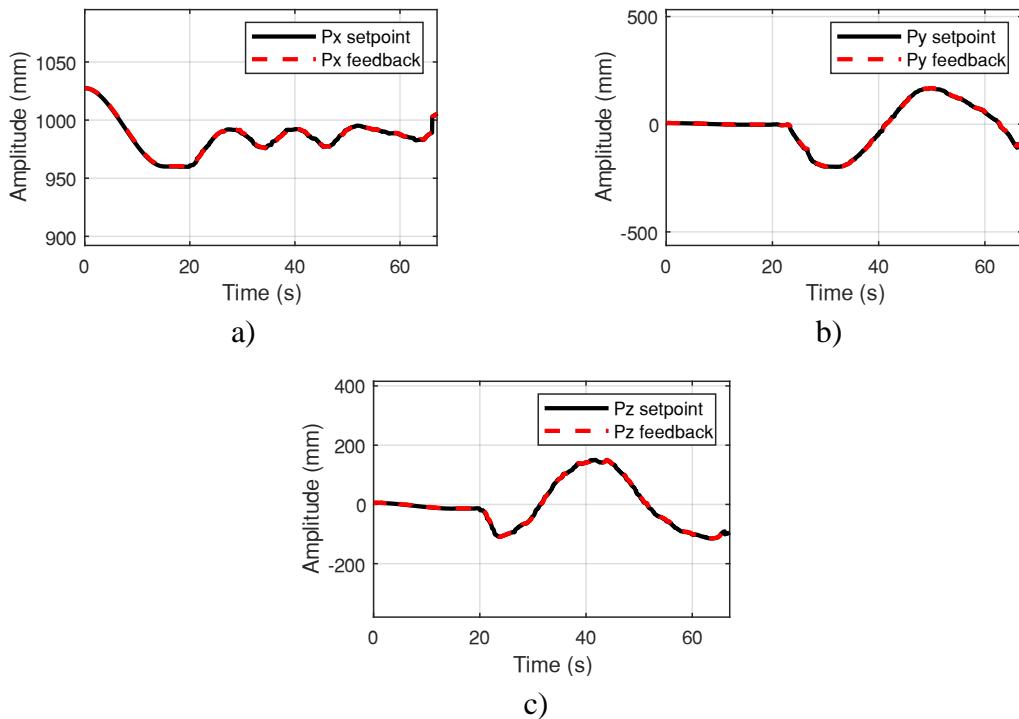
Tiến hành thu thập dữ liệu khi chạy hệ thống từ lúc ở vị trí home đến vị trí làm việc chung của 2 robot.



Hình 6.19: Quỹ đạo chuyển động của robot trong trường hợp điều khiển từ xa không có phản hồi lực; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

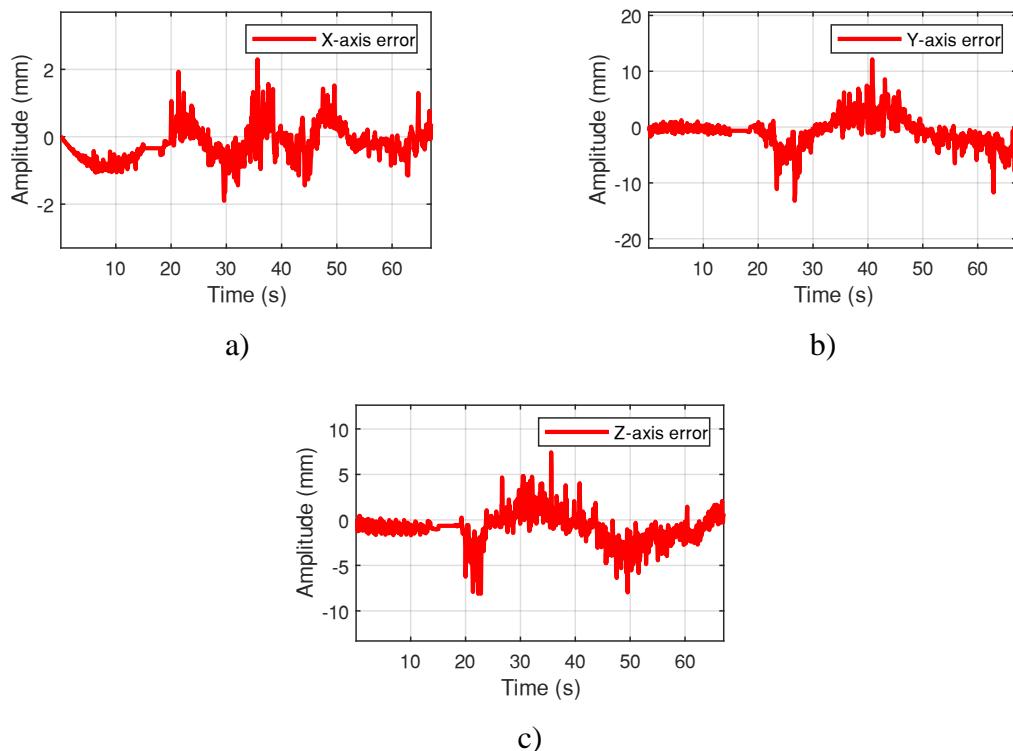
CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Dữ liệu sẽ được vẽ theo các trục x, y và z.



Hình 6.20: Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực

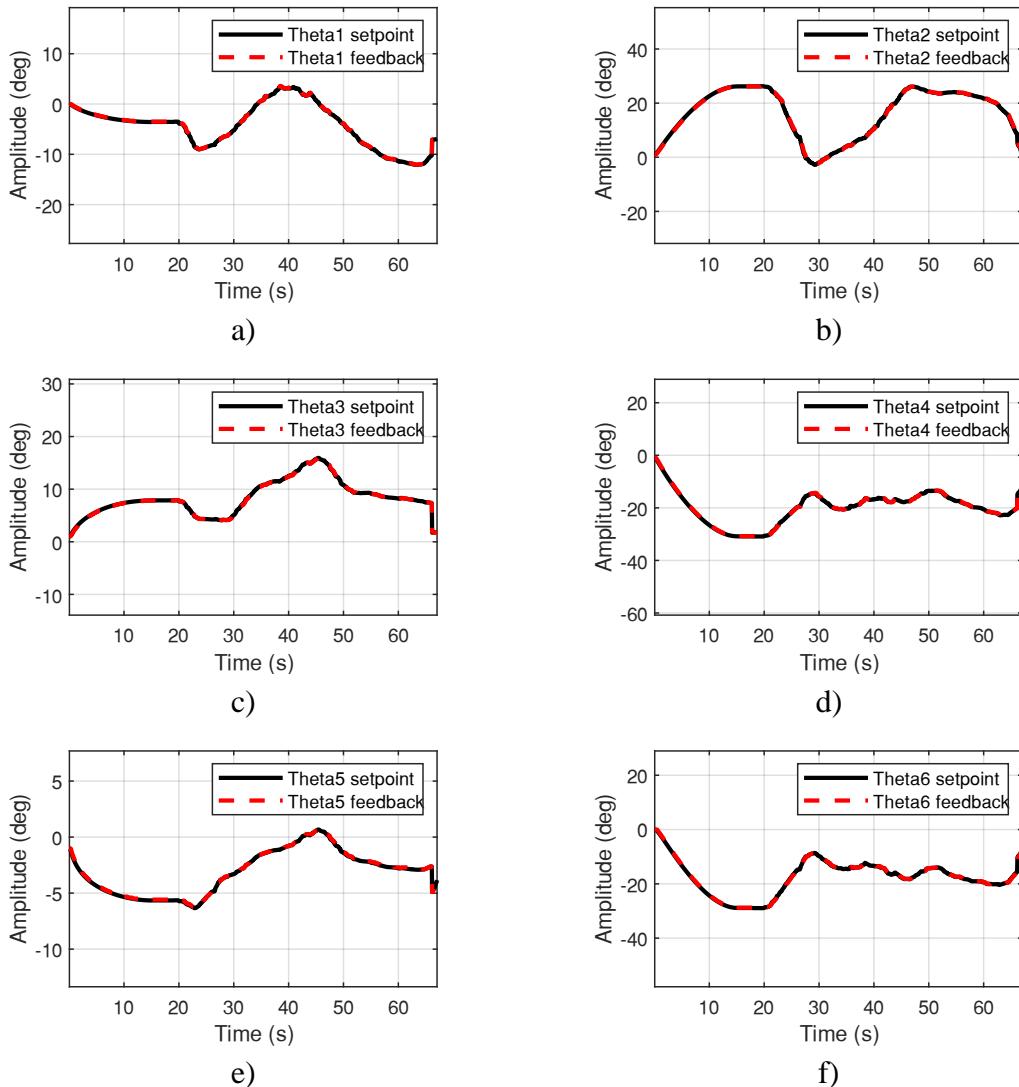
Dữ liệu sẽ được vẽ sai số theo các trục x, y và z.



Hình 6.21: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực

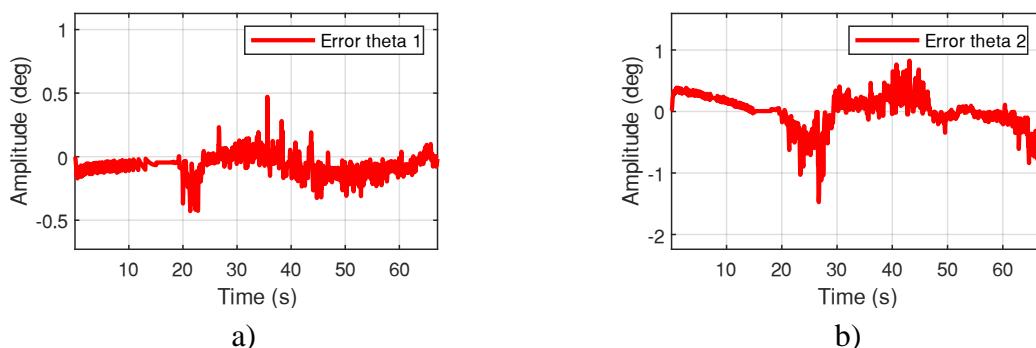
CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

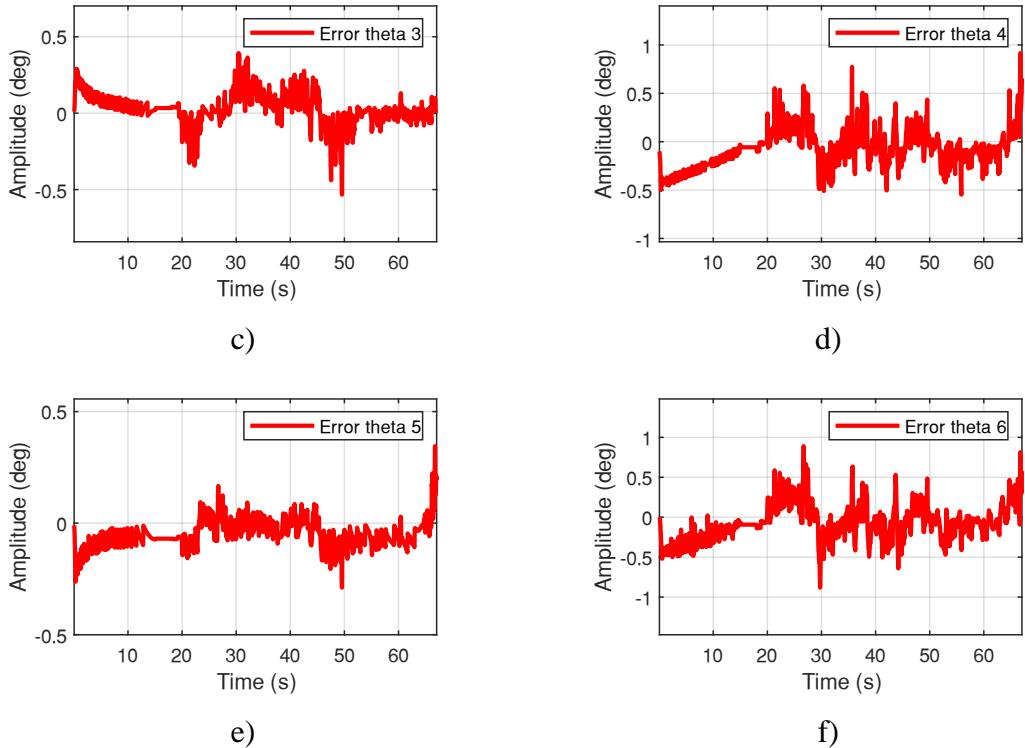
Quan sát đáp ứng vị trí robot theo thời gian, vị trí của robot bám theo tín hiệu đặt đã nhận được, đáp ứng vị trí của robot ổn định. Dựa vào đồ thị sai số vị trí, sai số trong khoảng nhỏ và mô hình hoạt động ổn định. Để đánh giá thêm, ta quan sát đồ thị các góc $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ và θ_6 đáp ứng như sau:



Hình 6.22: Tín hiệu đáp ứng góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6

Sai số góc xoay các khớp $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ và θ_6 đáp ứng như sau:

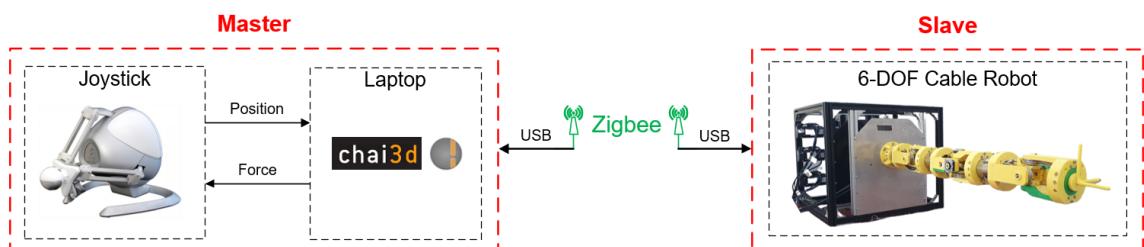




Hình 6.23: Tín hiệu sai số góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa không có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6

Từ những dữ liệu thu thập được từ vị trí góc xoay của động cơ, vị trí các góc khớp không xảy ra hiện tượng giao động hay vọt lố, biên dạng tín hiệu ổn định. Sai số các khớp nhỏ dưới 1 deg. Dựa vào kết quả thực nghiệm, mô hình robot đáp ứng khá ổn định, phương pháp anh xạ sử dụng có hiệu quả cao cho hệ thống điều khiển từ xa của cánh tay máy.

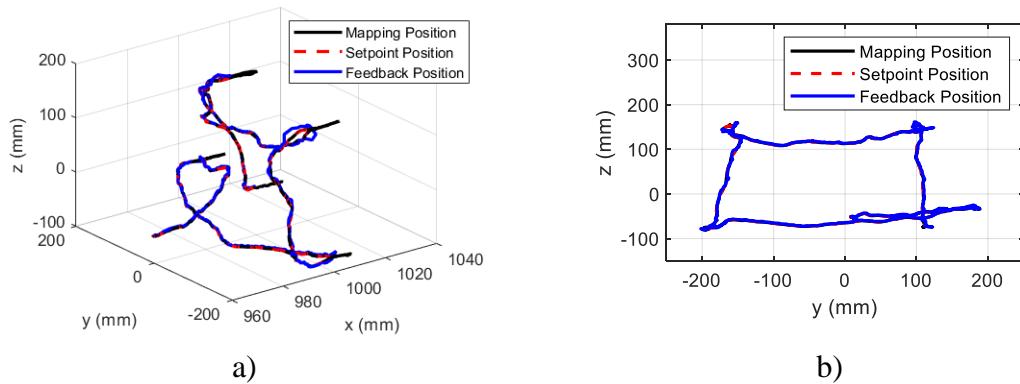
6.4 Thực nghiệm điều khiển từ xa cho robot có phản hồi lực



Hình 6.24: Tổng quan thực nghiệm điều khiển từ xa có phản hồi lực

Ở thực nghiệm điều khiển từ xa có phản hồi lực sẽ khác khi ta sẽ có Laptop tính toán giá trị lực rồi tác động ngược trở lại Joystick cho người dùng cảm nhận xúc giác tốt hơn trong việc vận hành hệ thống điều khiển từ xa. Thực nghiệm hệ thống điều khiển xa ta tiến hành thu thập dữ liệu từ mô hình robot và thiết bị joystick.

Ta có các hệ số được chọn như sau: $k = diag([2.5 \ 4 \ 4])$; $\mathbf{P}_w = [680 \ 0 \ 0]^T$

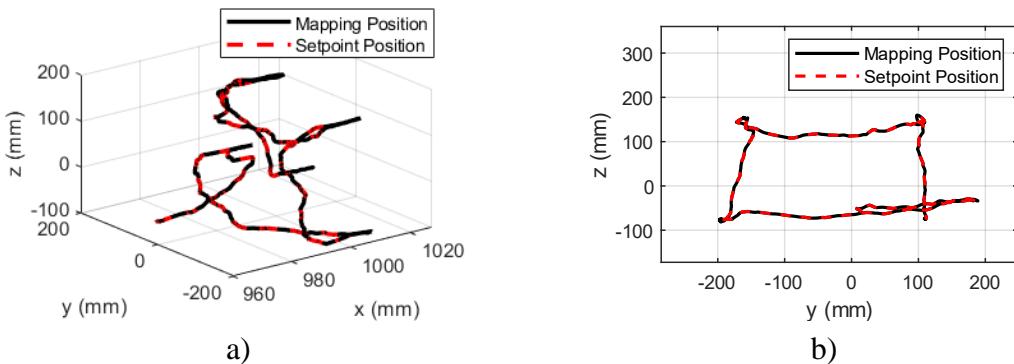


Hình 6.25: Quỹ đạo chuyển động của joystick sau khi ánh xạ, quỹ đạo tín hiệu đặt và quỹ đạo chuyển động của robot; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

Trong Hình 6.26, đường màu đen là vị trí sau khi ánh xạ mà joystick di chuyển, đường màu đỏ là tín hiệu đặt gửi cho robot cáp vận hành, đường màu xanh dương là đáp ứng thực tế của robot. Thông qua việc quan sát dữ liệu thu thập được, tín hiệu cho thấy phương pháp phản hồi lực giúp hệ thống ổn định mặc dù có những vùng nằm ngoài không gian làm việc của robot cáp (vị trí đặt không trùng với vị trí ánh xạ) khi thiết bị joystick di chuyển vào vùng kỵ dị.

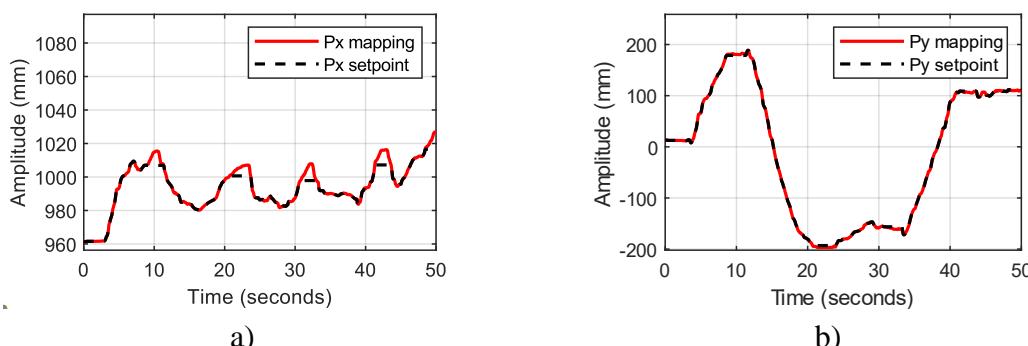
6.4.1 Dữ liệu được thu thập trên master

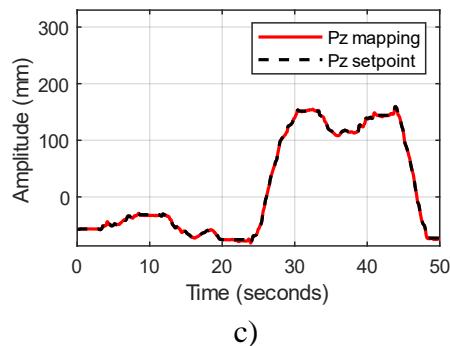
Tiến hành thu thập dữ liệu khi chạy robot cáp ở vị trí ban đầu đến vị trí làm việc chung của 2 robot.



Hình 6.26: Quỹ đạo chuyển động của robot trong trường hợp điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

Dữ liệu sẽ được vẽ theo các trục x, y và z.

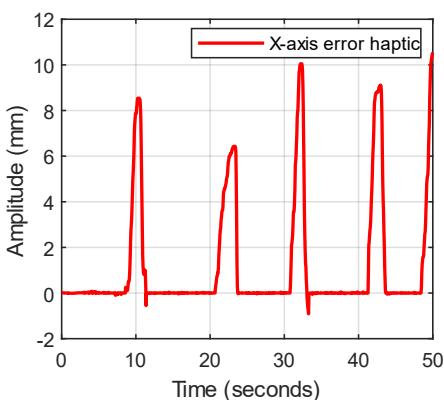




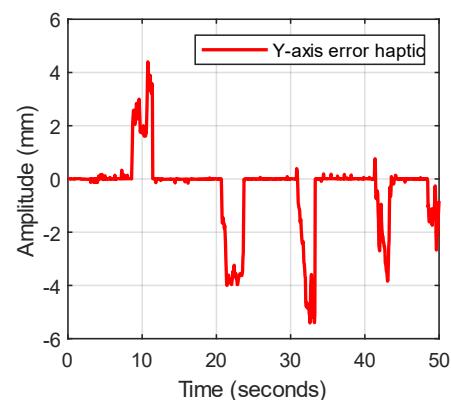
c)

Hình 6.27: Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực

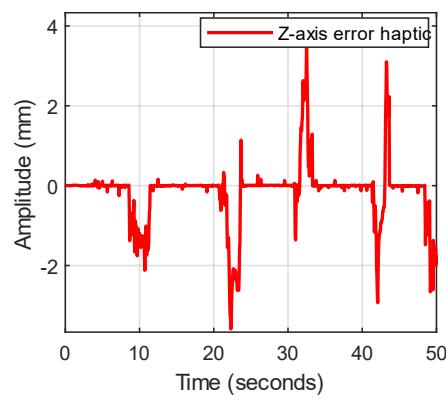
Dữ liệu sẽ được vẽ sai số theo các trục x, y và z.



a)



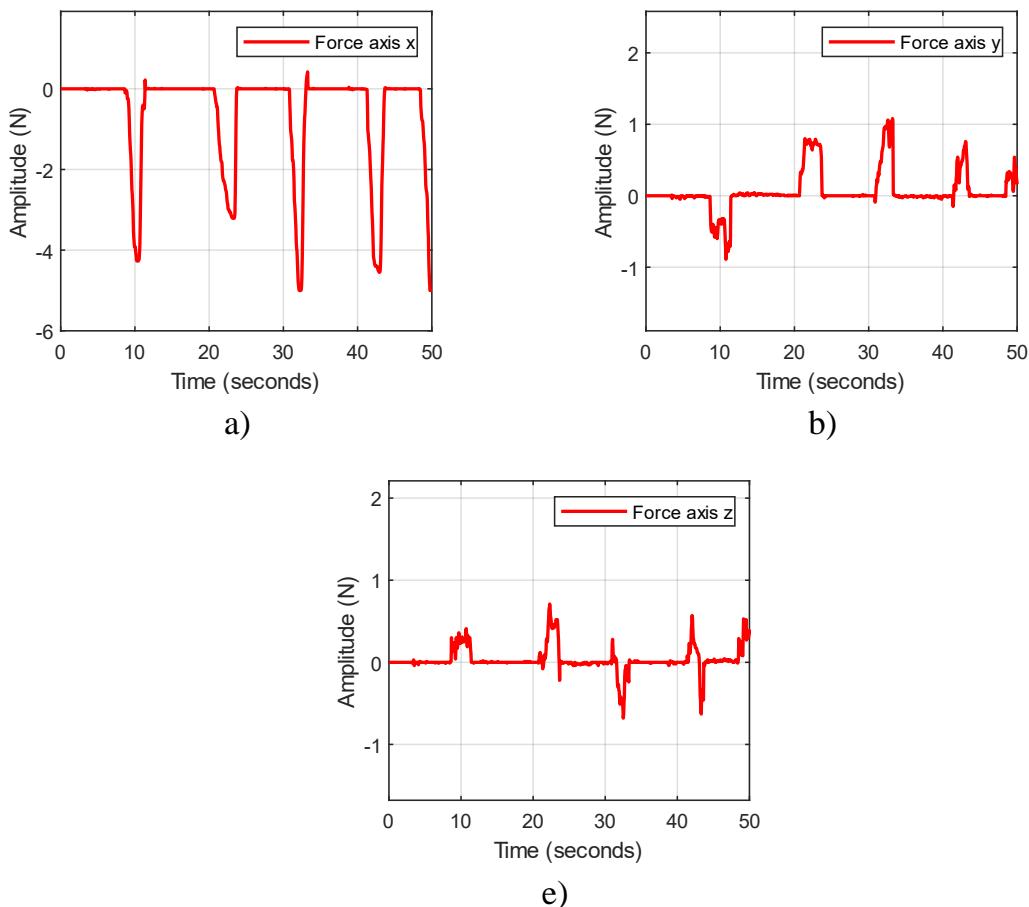
b)



c)

Hình 6.28: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực

Quan sát tín hiệu vị trí sau khi ánh xạ và vị trí đặt gửi cho robot cáp trên master của hệ thống, tại những điểm kỳ dị ngoài không gian làm việc, vị trí đặt không bám theo tín hiệu ánh xạ, hệ thống chuyển sang chế độ phản hồi lực, lực cản tạo ra tỉ lệ với sai số giữa điểm ở biên không gian làm việc robot cáp và vị trí ánh xạ. Do đó end effector của joystick được kéo trở lại vào không gian làm việc và robot sẽ tiếp tục vận hành.

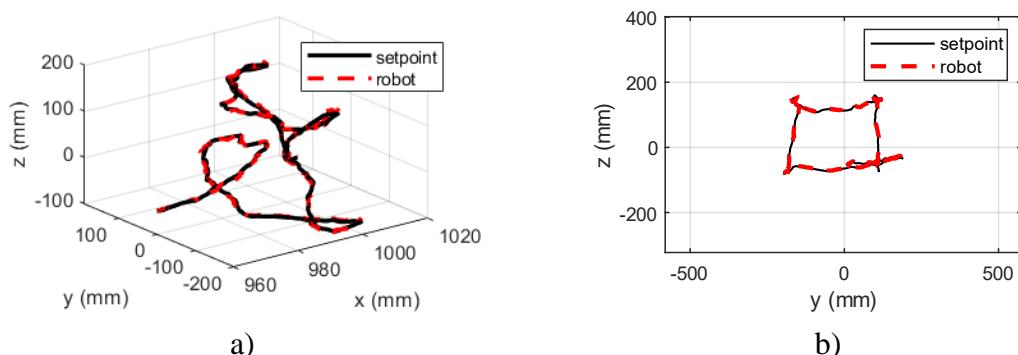


Hình 6.29: Tín hiệu lực tác động theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng mô phỏng hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực

6.4.2 Dữ liệu được thu thập trên slave

Để biết được hệ thống có phản hồi lực vận hành ổn định hơn khi chưa có phản hồi lực hay không, dữ liệu thu thập được trên hệ thống slave cần được thu thập và so sánh với tín hiệu trên hệ thống master khi vận hành. Dữ liệu được thu thập cùng trường hợp với quỹ đạo như dữ liệu trên master.

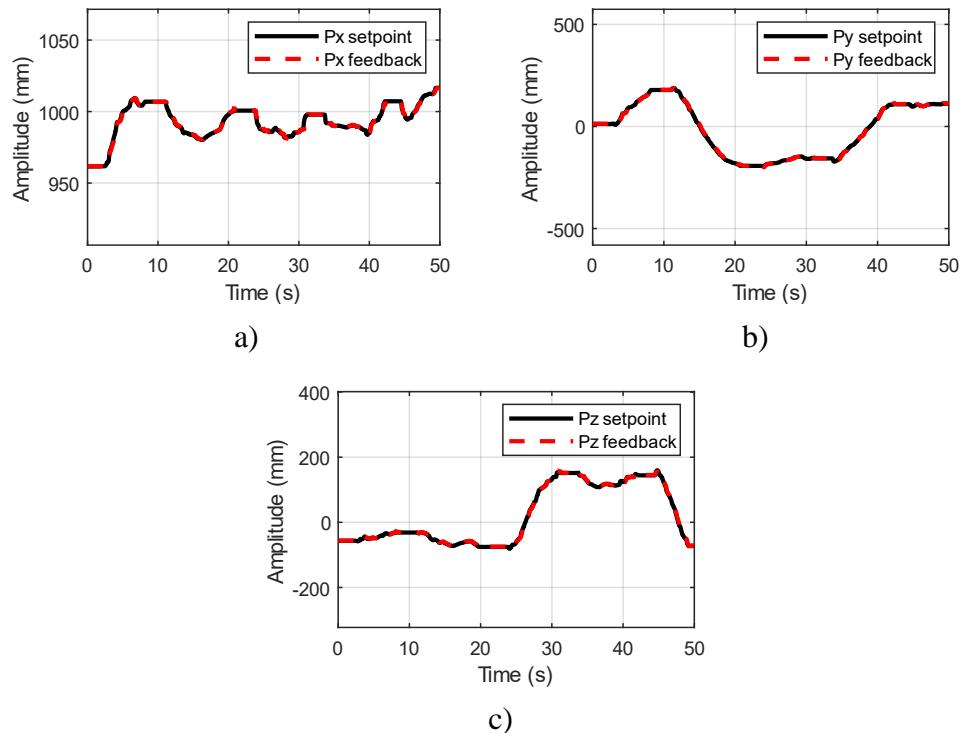
Tiến hành thu thập dữ liệu khi chạy robot cáp ở vị trí ban đầu đến vị trí làm việc chung của 2 robot.



Hình 6.30: Quỹ đạo chuyển động của robot trong trường hợp điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) góc nhìn 3D; b) góc nhìn YOZ

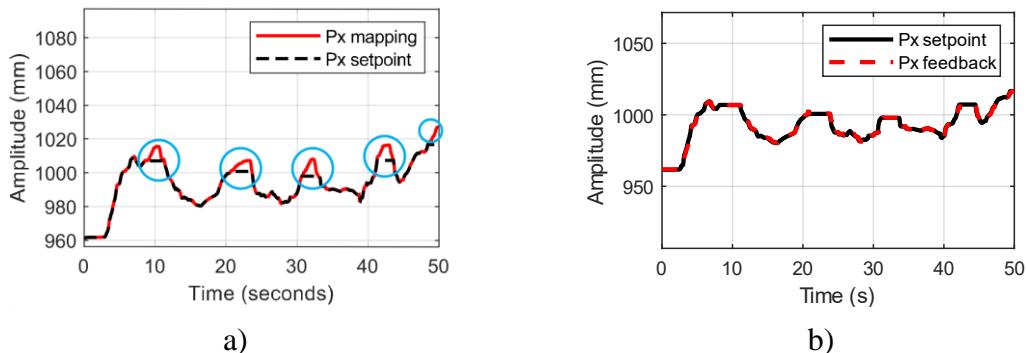
CHƯƠNG 6: THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Dữ liệu sẽ được vẽ theo các trục x, y và z trên hệ thống slave.



Hình 6.31: Tín hiệu vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực (slave)

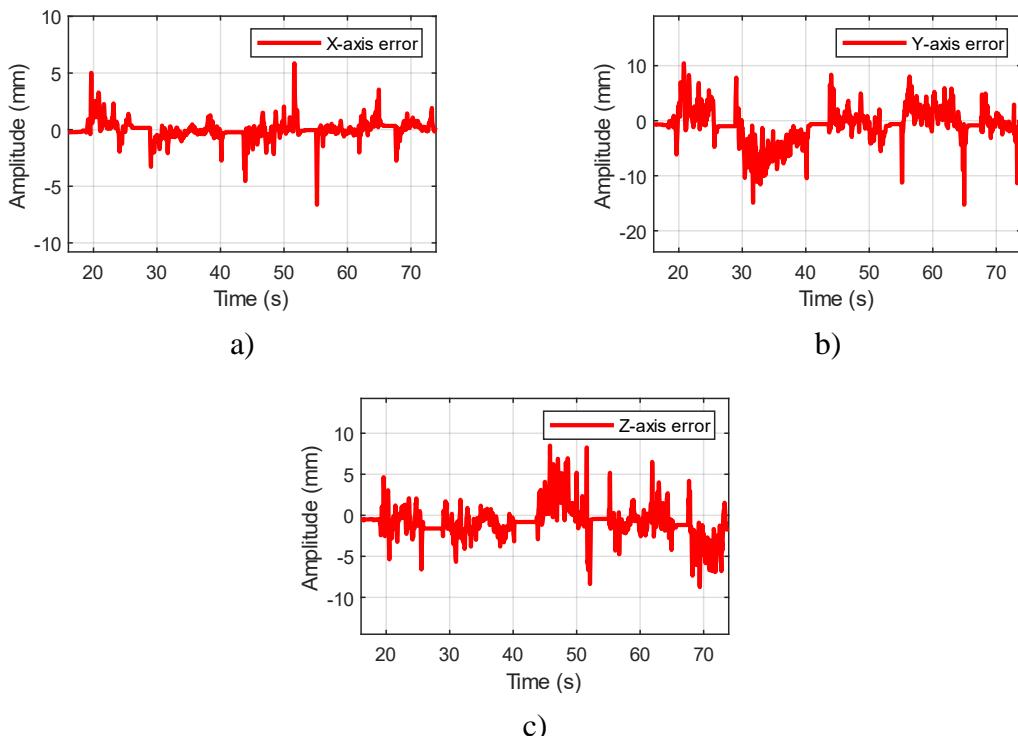
Quan sát tín hiệu mà robot thu thập khi vận hành, vị trí không xảy ra hiện tượng giao động hay thay đổi vị trí đột ngột. Để đánh giá thêm quan sát tín hiệu so sánh như hình sau:



Hình 6.32: a) Đáp ứng vị trí theo trục x chưa có phản hồi lực (master); b) đáp ứng vị trí theo trục x khi có phản hồi lực (slave)

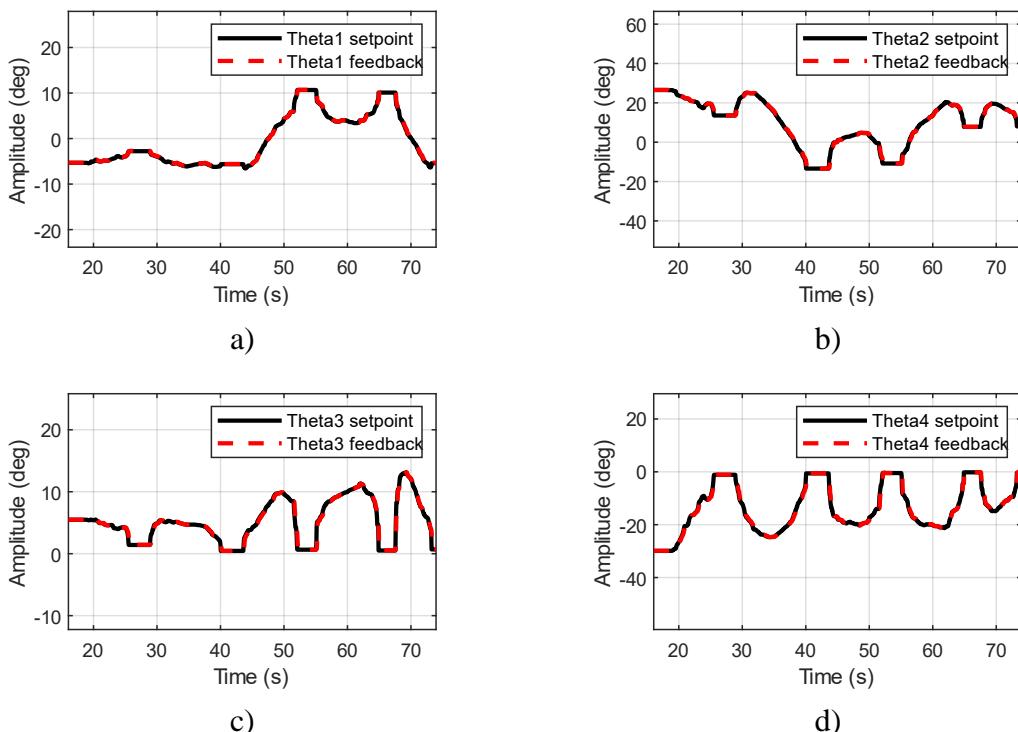
Từ Hình 6.32 có thể thấy rằng vị trí của robot bám theo tín hiệu đặt mà máy tính master đã gửi. Không có vị trí nằm ngoài khung gian làm việc của robot.

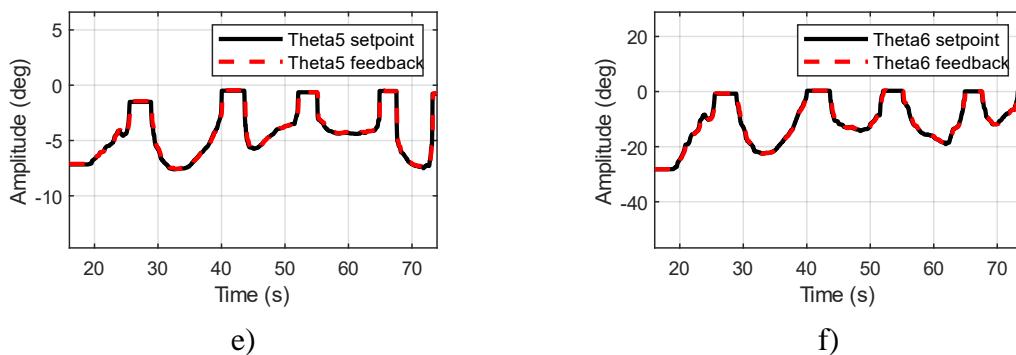
Dữ liệu sẽ được vẽ sai số theo các trục x, y và z.



Hình 6.33: Tín hiệu sai số vị trí theo a) trục x, b) trục y và c) trục z khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực (slave)

Góc xoay các khớp $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ và θ_6 đáp ứng như sau:

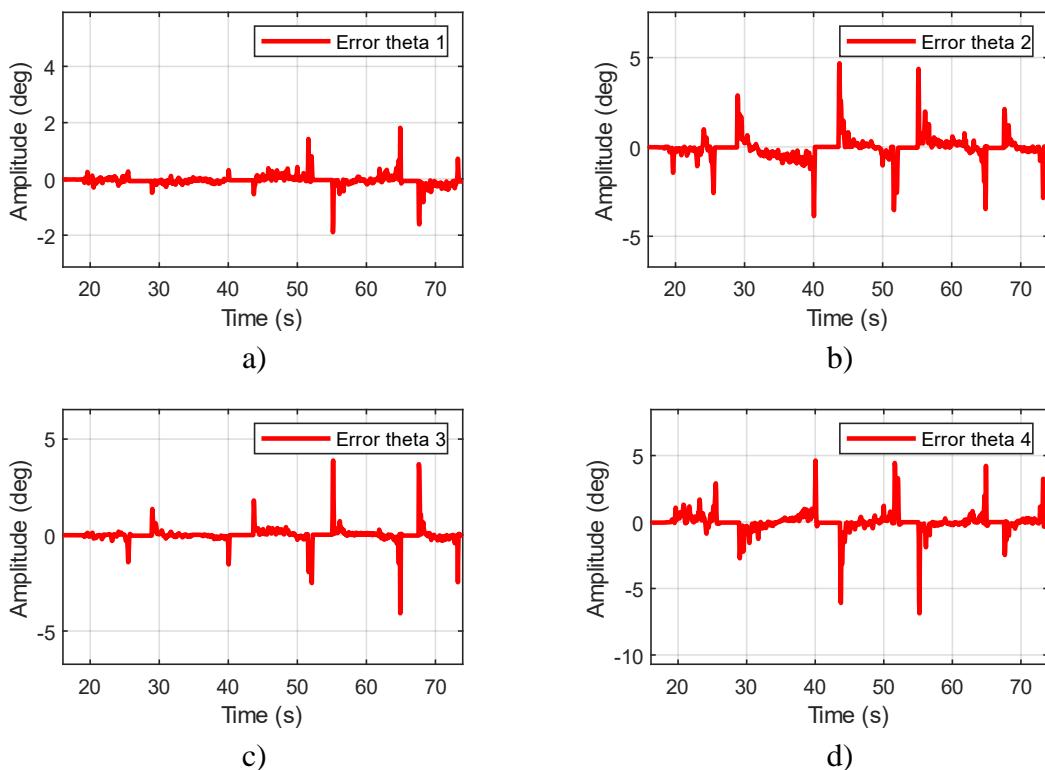


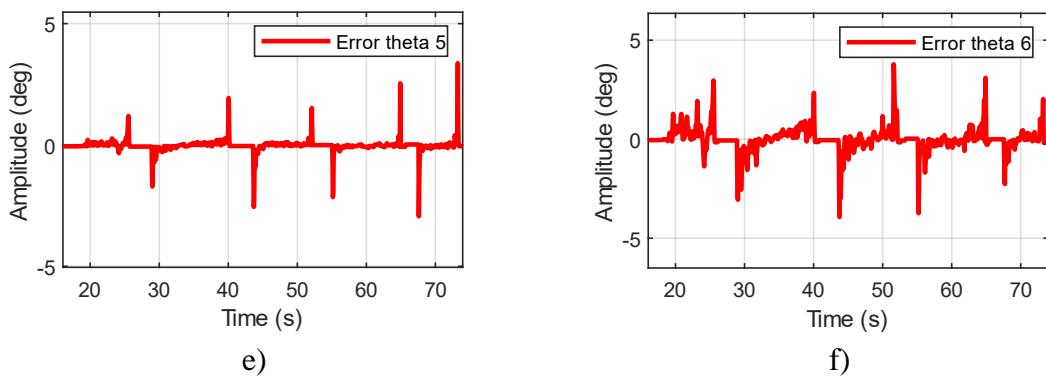


Hình 6.34: Tín hiệu đáp ứng góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6

Quan sát thêm đáp ứng các góc khớp theo thời gian, tại những điểm nằm ngoài không gian làm việc robot không di chuyển, điều này thể hiện qua vị trí góc là đường nằm ngang. Sau khi người vận hành di chuyển lại vào không gian làm việc, robot sẽ vận hành trở lại.

Sai số góc xoay các khớp $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ và θ_6 đáp ứng như sau:



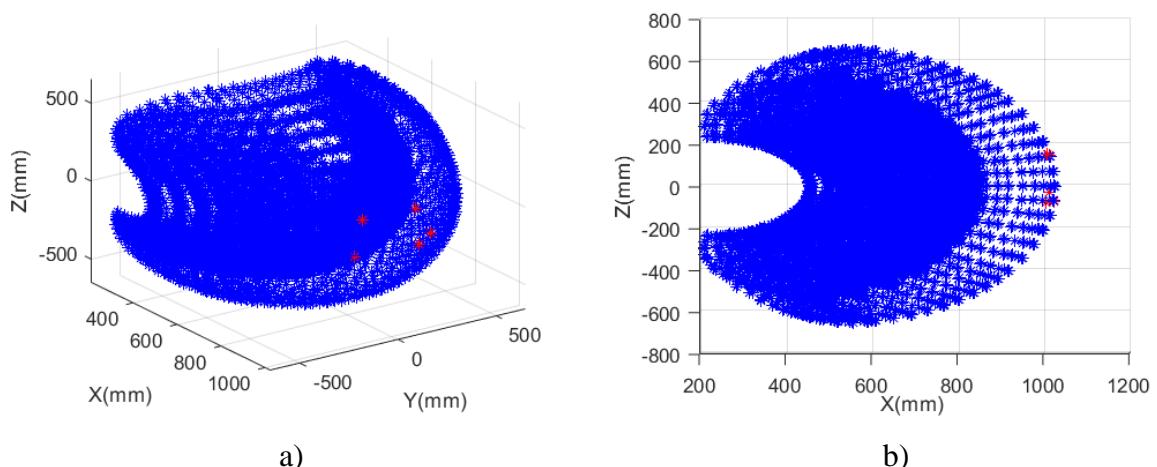


Hình 6.35 Tín hiệu sai số góc xoay của các khớp khi kiểm chứng thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa có phản hồi lực; a) khớp 1; b) khớp 2; c) khớp 3; d) khớp 4; e) khớp 5; f) khớp 6

Từ những dữ liệu đã được thu thập ở trên ta thấy rằng robot cáp 6 bậc tự do vẫn bám tốt theo tín hiệu đặt từ master gửi xuống và không di chuyển vào những điểm kỳ dị nằm ở bên ngoài vùng làm việc. Việc phản hồi lực tiến hành khi ta di chuyển thiết bị phản hồi lực ra vùng nằm ngoài không gian làm việc của robot cáp 6 bậc tự do để giúp xúc giác của người vận hành có thể cảm nhận được và đưa thiết bị phản hồi lực di chuyển vào bên trong vùng làm việc.

Trong thí nghiệm trên, có 5 lần Joystick đưa ra những vùng nằm ngoài không gian làm việc, ta xét mỗi điểm ở từng trường hợp trong khoảng thời gian này lần lượt là P_1, P_2, P_3, P_4 và P_5 . Với vị trí các điểm như sau $P_1 = (1013.2; 180.43; -32.65)$, $P_2 = (1004.2; -196.8; -75.74)$, $P_3 = (1007.6; -161; 154.16)$, $P_4 = (1011.7; 107.69; 143.6)$ và $P_5 = (1023; 111.1; -74.2)$.

Ta có thấy 5 điểm như trên nằm sát ngoài rìa vùng không gian làm việc của robot cáp như trong hình dưới đây:



Hình 6.36: Vị trí điểm nằm ngoài vùng không gian làm việc của robot trong không gian a) Oxyz; b) Oxz khi tiến hành chạy thực nghiệm

CHƯƠNG 7: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

7.1 Kết luận

Sau quá trình nghiên cứu và thực hiện đề tài: “thiết kế mô hình và bộ điều khiển từ xa cho robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do”, nhóm đã đạt được những kết quả sau:

- Thiết kế mô hình robot cáp nối tiếp 6 bậc tự do hoàn chỉnh trên phần mềm Solidworks phiên bản 2021
- Tính toán được động học thuận và động học nghịch thông minh Jacobian cho robot cáp 6 bậc tự do
- Tính toán được động học thuận và động học nghịch cho thiết bị phản hồi lực Novint Falcon (robot song song 3 bậc tự do)
- Mô phỏng chuyển động, kiểm chứng động học trên mô hình Simscape của robot cáp 6 bậc tự do bằng phần mềm MATLAB Simulink 2022a
- Xây dựng và kiểm chứng thành công hệ thống mạng điều khiển phân tán (mạng CAN 7 node)
- Xây dựng thành công hệ thống điều khiển từ xa kết hợp với phản hồi lực cho robot cáp 6 bậc tự do dùng thiết bị Novint Falcon
- Thi công thành công mô hình robot cáp 6 bậc tự do và tủ điều khiển. Xây dựng giao diện tương tác người dùng trên board Jetson nano để điều khiển và thu thập dữ liệu
- Thực nghiệm hệ thống điều khiển từ xa, điều khiển chính xác vị trí robot dựa vào điều khiển chính xác vị trí cơ cấu chấp hành kết hợp với phản hồi lực về cho người dùng
- Những hạn chế còn tồn tại trong quá trình thực hiện đề tài như sau:
 - Việc thiết lập trạng thái home cho robot được làm thủ công nên sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của hệ thống
 - Mạng truyền thông không dây Zigbee dễ bị tác động bởi nhiều từ môi trường bên ngoài, tốc độ truyền mạng vẫn còn hạn chế

7.2 Hướng phát triển

Từ những hạn chế bên trên, hướng phát triển trong tương lai của đề tài sẽ sử dụng cảm biến để xét trạng thái ban đầu cho robot tăng sự chính xác trong vận hành robot. Cải thiện chất lượng đường truyền mạng không dây dùng Zigbee sang module wifi để cải thiện chất lượng đường truyền cũng như khoảng cách điều khiển. Nghiên cứu về việc bố trí và đi dây cáp trên robot để tối ưu về không gian chuyển động cũng như tăng khả năng mang tải cho robot. Xây dựng các bộ điều khiển thông minh để bù lại sự giòn cáp trong quá trình chuyển động của robot.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Hägele, K. Nilsson, J. N. Pires, and R. Bischoff, "Industrial robotics," *Springer handbook of robotics*, pp. 1385-1422, 2016.
- [2] T. George Thuruthel, Y. Ansari, E. Falotico, and C. Laschi, "Control Strategies for Soft Robotic Manipulators: A Survey," *Soft Robot*, vol. 5, no. 2, pp. 149-163, Apr 2018, doi: 10.1089/soro.2017.0007.
- [3] J. Burgner-Kahrs, D. C. Rucker, and H. Choset, "Continuum Robots for Medical Applications: A Survey," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1261-1280, 2015, doi: 10.1109/tro.2015.2489500.
- [4] A. H. G. o. g. Wilhelm Johan Marais, "Design and Control of CRAM A Highly Articulated Cable-driven Remote Access Manipulator for Confined Space Inspection," *ACRA*, 2017.
- [5] W. Marais, & Göktogan, "A New Manipulability Measure for the Control of CRAM: A Cable-driven Remote Access Manipulator," *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA-2017)*, 2017, December.
- [6] H. Su *et al.*, "Pneumatic Soft Robots: Challenges and Benefits," *Actuators*, vol. 11, no. 3, 2022, doi: 10.3390/act11030092.
- [7] Z. M. T. Liu, H. Wang, W. Xu, and Y. Li, "A Cable-Driven Redundant Spatial Manipulator with Improved Stiffness and Load Capacity," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018.
- [8] W. Xu, T. Liu, and Y. Li, "Kinematics, Dynamics, and Control of a Cable-Driven Hyper-Redundant Manipulator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1693-1704, 2018, doi: 10.1109/tmech.2018.2842141.
- [9] Y. Zheng *et al.*, "Design and validation of cable-driven hyper-redundant manipulator with a closed-loop puller-follower controller," *Mechatronics*, vol. 78, 2021, doi: 10.1016/j.mechatronics.2021.102605.
- [10] J. Bruce, K. Caluwaerts, A. Iscen, A. P. Sabelhaus, and V. SunSpiral, "Design and evolution of a modular tensegrity robot platform," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014: IEEE, pp. 3483-3489.
- [11] D. S. Shah *et al.*, "Tensegrity robotics," *Soft robotics*, vol. 9, no. 4, pp. 639-656, 2022.
- [12] L. Barbazza, F. Oscari, S. Minto, and G. Rosati, "Trajectory planning of a suspended cable driven parallel robot with reconfigurable end effector," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 48, pp. 1-11, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2017.02.001.
- [13] A. Khalifa, A. Ramadan, K. Ibrahim, M. Fanni, S. Assal, and A. Abo-Ismail, "Workspace mapping and control of a teleoperated endoscopic surgical robot," in *2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2014: IEEE, pp. 675-680.
- [14] R. Saltaren, A. R. Barroso, and O. Yakrangi, "Robotics for Seabed Teleoperation: Part-1-Conception and Practical Implementation of a Hybrid Seabed Robot," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 60559-60569, 2018, doi: 10.1109/access.2018.2876040.
- [15] C. J. M. Martinez, R. C. Salguero, R. Palomares, and J. Cornejo, "Mechatronics development of terrestrial mobile robot for exploring and monitoring environmental parameters at mine analogue sites using IoT platform," in *2020*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2020: IEEE, pp. 1-4.*
- [16] T. D. Nguyen, P. T. Phan, and T. T. Nguyen, "Design Dynamic Models for Cable Robot Spraying Pesticides in Agricultural Production," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, pp. 516-520, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.4.516-520.
- [17] T. P. Tho and N. T. Thinh, "Using a Cable-Driven Parallel Robot with Applications in 3D Concrete Printing," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: 10.3390/app11020563.
- [18] S.-J. Huang, H.-D. Liu, C. K. Huang, C.-C. Ting, and C.-H. Chen, "Hybrid force/position control of master and slave robotic systems," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 43, no. 8, pp. 713-724, 2020, doi: 10.1080/02533839.2020.1771208.
- [19] M. Mamdouh and A. A. Ramadan, "Development of a teleoperation system with a new workspace spanning technique," in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2012: IEEE, pp. 1570-1575.
- [20] S. Ehrampoush, M. Dave, M. A. Kia, C. Rablau, and M. H. Zadeh, "Providing haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery: a direct optical force-sensing solution for haptic rendering of deformable bodies," *Comput Aided Surg*, vol. 18, no. 5-6, pp. 129-41, 2013, doi: 10.3109/10929088.2013.839744.
- [21] M. C. Lin and M. Otaduy, *Haptic rendering: foundations, algorithms, and applications*. CRC Press, 2008.
- [22] G. Liu, X. Geng, L. Liu, and Y. Wang, "Haptic based teleoperation with master-slave motion mapping and haptic rendering for space exploration," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 3, pp. 723-736, 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.07.009.
- [23] K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli, "Haptic rendering: introductory concepts," *IEEE computer graphics and applications*, vol. 24, no. 2, pp. 24-32, 2004.