

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**  
**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT**  
**ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP BỘ**

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN**  
**ĐỒNG BỘ THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT**  
**SONG SONG PHẪNG**

**Mã số: KYTH - 17**

**Chủ nhiệm đề tài: PGS. TS. LÊ TIẾN DŨNG**

**Đà Nẵng, 12/2018**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**  
**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT**  
**ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP BỘ**

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN**  
**ĐỒNG BỘ THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT**  
**SONG SONG PHẪNG**

**Mã số: KYTH - 17**

**Xác nhận của tổ chức chủ trì**

*(ký, họ tên, đóng dấu)*

**Chủ nhiệm đề tài**

*(ký, họ tên)*

**Đà Nẵng, 12/2018**

## DANH SÁCH CÁC THÀNH VIÊN THAM GIA ĐỀ TÀI

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác
1	Lê Tiến Dũng	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
2	Huỳnh Tấn Tiến	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
3	Đoàn Quang Vinh	Đại học Đà Nẵng
4	Trương Thị Bích Thanh	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
5	Nguyễn Lê Hòa	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
6	Giáp Quang Huy	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
7	Ngô Đình Thanh	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
8	Trần Thái Anh Âu	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
9	Nguyễn Kim Ánh	Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng
10	Dương Tấn Quốc	Học viên cao học tại Khoa Điện, trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

## ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH

Tên đơn vị trong và ngoài nước	Nội dung phối hợp nghiên cứu	Họ và tên người đại diện đơn vị
Khoa Điện, trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng	- Phối hợp triển khai ứng dụng kết quả nghiên cứu của đề tài trong đào tạo sau đại học.	TS. Nguyễn Hữu Hiếu
Phòng thí nghiệm Hệ thống Robot thông minh, Trường Đại học Ulsan, Hàn Quốc	- Phối hợp phân tích mô hình động lực học cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do có xét đến các thành phần ma sát, sai số mô hình và nhiễu loạn. - Chạy chương trình mô phỏng trên máy tính cấu hình mạnh.	GS. Hee-Jun Kang

## MỤC LỤC

Danh mục các hình vẽ	v
Danh mục các bảng biểu	ix
Danh mục các chữ viết tắt	x
Thông tin về kết quả nghiên cứu bằng tiếng Việt	xi
Thông tin kết quả nghiên cứu bằng tiếng Anh	xvi
<b>PHẦN MỞ ĐẦU</b>	<b>1</b>
TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI	1
MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU	4
ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU	4
CÁCH TIẾP CẬN, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	5
<b>CHƯƠNG 1 – TỔNG QUAN VỀ ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Giới thiệu chung</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Tổng quan về các phương pháp điều khiển tay máy robot song song phẳng trên thế giới</b>	<b>9</b>
<i>1.2.1. Thuật toán điều khiển PD kết hợp bù trọng lực</i>	10
<i>1.2.2. Điều khiển PD, PID phi tuyến</i>	11
<i>1.2.3. Điều khiển mờ trượt</i>	12
<b>CHƯƠNG 2 – XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Giới thiệu</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Xây dựng mô hình động lực học cho một tay máy robot song song phẳng dạng tổng quát</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Xây dựng mô hình động lực học cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do</b>	<b>20</b>
<i>2.3.1. Mô hình động học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do</i>	20
<i>2.3.2. Mô hình động học lực học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do</i>	30

<b>CHƯƠNG 3 – NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG</b>	<b>37</b>
3.1. Giới thiệu về thuật toán điều khiển đồng bộ	37
3.2. Mạng nơ-ron xuyên tâm	40
3.3. Đề xuất bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng dạng tổng quát	41
3.4. Thiết kế thuật toán chỉnh định online và phân tích ổn định của hệ thống	45
<b>CHƯƠNG 4 – MÔ PHỎNG KIỂM NGHIỆM</b>	<b>48</b>
4.1. Xây dựng mô hình của hệ thống trên matlab-simulink	48
4.2. Xây dựng mô hình tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trên solidworks	51
4.3. Kết quả mô phỏng thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi	53
<b>CHƯƠNG 5 – THỬ NGHIỆM CHẾ TẠO MÔ HÌNH PHẦN CỨNG CỦA ROBOT</b>	<b>62</b>
5.1. Mô tả mô hình phần cứng	62
5.1.1. Sơ đồ tổng quát của mô hình	62
5.1.2. Máy tính giám sát	63
5.1.3. MCU xử lý và tính toán dữ liệu	63
5.1.4. MCU xuất dữ liệu	65
5.1.5. Bộ DAC	66
5.1.6. Động cơ và driver	70
5.1.7. Sơ đồ kết nối của cả hệ thống	76
5.1.8. Chế tạo phần cơ khí	77
5.2. Các kết quả thực nghiệm	79
<b>KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN</b>	<b>85</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO</b>	<b>86</b>
<b>PHỤ LỤC</b>	<b>91</b>

**Phụ lục 1 – Bản photo thuyết minh của đề tài**

**Phụ lục 2 - Các sản phẩm khoa học của đề tài**

**Phụ lục 2 – Các sản phẩm đào tạo**

**Phụ lục 3 – Các sản phẩm ứng dụng**

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Tên hình vẽ	Trang
<b>Hình I.</b> Một số tay máy robot song song	2
<b>Hình 1.1.</b> Cấu trúc hình học của robot nối tiếp và song song	7
<b>Hình 1.2.</b> Hệ thống điều khiển theo thuật toán trượt đồng bộ cho cơ cấu song song	13
<b>Hình 2.1.</b> Một tay máy robot song song dạng tổng quát	16
<b>Hình 2.2.</b> Hai cách khác nhau (a và b) để thực hiện cắt ảo tạo nên hệ thống hở tương đương từ hệ thống kín ban đầu	17
<b>Hình 2.3.</b> Tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR	21
<b>Hình 2.4.</b> Cấu hình kỳ dị loại 1 khi ít nhất 1 thanh bị duỗi thẳng ra	27
<b>Hình 2.5.</b> Cấu hình kỳ dị loại 1 khi ít nhất 1 thanh bị gấp lại	28
<b>Hình 2.6.</b> Cấu hình kỳ dị loại 2 khi các tất cả các chuỗi nối tiếp cắt nhau tại một điểm	28
<b>Hình 2.7.</b> Cấu hình kỳ dị loại 2 khi các thanh song song nhau	29
<b>Hình 2.8.</b> Cấu hình kỳ dị loại 3 khi các thanh vừa bị căng vừa cắt nhau tại một điểm	29
<b>Hình 2.9.</b> Cấu hình kỳ dị loại 3 khi các thanh vừa bị duỗi thẳng vừa song song nhau	30
<b>Hình 2.10.</b> Mô hình hệ thống hở tương đương 3-RRR	
<b>Hình 3.1.</b> Nguyên lý cơ bản điều khiển đồng bộ nhiều trục của robot song song	38
<b>Hình 3.2.</b> Cấu trúc của một mạng nơ-ron xuyên tâm 3 lớp, có L nơ-ron ở lớp ẩn	40

<b>Hình 3.3.</b> Sơ đồ khối cấu trúc của bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất	44
<b>Hình 4.1.</b> Sơ đồ khối cấu trúc mô phỏng hệ thống	49
<b>Hình 4.2.</b> Kết quả xây dựng thuật toán trên Matlab	50
<b>Hình 4.3.</b> Mô hình robot đã được lắp ghép	52
<b>Hình 4.4.</b> Tiện ích Simcape Mutibody Link	53
<b>Hình 4.5.</b> Mô hình cơ khí của Tobot 3RRR từ Solidworks đã tích hợp vào trên Simulink	53
<b>Hình 4.6.</b> So sánh kết quả điều khiển bám quỹ đạo giữa 3 trường hợp: Điều khiển tính mô-men (đường màu xanh lá cây), Điều khiển đồng bộ tính mô-men (đường màu xanh da trời) và bộ điều khiển đồng bộ thích nghi của đề tài đề xuất (đường màu đỏ)	55
<b>Hình 4.7.</b> So sánh sai số bám quỹ đạo của các khớp chủ động: a) Sai số của khớp chủ động 1; b) Sai số của khớp chủ động 2 và c) Sai số của khớp chủ động 3	57
<b>Hình 4.8.</b> So sánh sai số bám quỹ đạo của khâu chấp hành cuối a) Error in the X-direction; b) Error in the Y-direction; and c) Error of rotary angle	58
<b>Hình 4.9.</b> a) Kết quả chỉnh định online các tham số của mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm b) Kết quả chỉnh định online các tham số của các bộ bù sai số	59
<b>Hình 5.1.</b> Sơ đồ tổng quát của mô hình phần cứng robot	62
<b>Hình 5.2.</b> Sơ đồ cấu trúc của KIT STM32F4	63
<b>Hình 5.3.</b> Kit STM32F4 discovery	64



<b>Hình 5.4.</b> Bộ công cụ lập trình Waijung Blockset trong thư viện Simulink	66
<b>Hình 5.6.</b> Sơ đồ nguyên lý của mạch chuyển đổi DAC	66
<b>Hình 5.7.</b> Sơ đồ cấu trúc MCP4921	67
<b>Hình 5.8.</b> Cấu trúc dữ liệu cần truyền của MCP4912	68
<b>Hình 5.9.</b> Sơ đồ nguyên lý mạch trừ vi sai	70
<b>Hình 5.10.</b> Động cơ servo Omron và driver SDGA	70
<b>Hình 5.11.</b> Sơ đồ nối dây của driver SDGA	72
<b>Hình 5.12.</b> Sơ đồ đấu nối giữa động cơ và driver	73
<b>Hình 5.13.</b> Sơ đồ kết nối của cả hệ thống	76
<b>Hình 5.14.</b> Mô hình thực tế của robot	77
<b>Hình 5.16.</b> Hộp số GPL052	78
<b>Hình 5.17.</b> Đồ thị kết quả thực nghiệm khâu chấp hành cuối bám theo quỹ đạo	79
<b>Hình 5.18.</b> Đồ thị sai số của mô hình theo phương X	80
<b>Hình 5.19.</b> Đồ thị sai số của mô hình theo phương Y	80
<b>Hình 5.20.</b> Đồ thị sai số góc quay của khâu chấp hành cuối	80
<b>Hình 5.21.</b> Đồ thị kết quả điều khiển khớp chủ động 1	81
<b>Hình 5.22.</b> Phóng to kết quả tại vị trí đỉnh của góc chủ động 1	81
<b>Hình 5.23.</b> Đồ thị sai số góc điều khiển của khớp chủ động 1	81
<b>Hình 5.24.</b> Đồ thị kết quả điều khiển khớp chủ động 2	82

<b>Hình 5.25.</b> <i>Phóng to kết quả tại vị trí đỉnh của góc chủ động 2</i>	82
<b>Hình 5.26.</b> <i>Đồ thị sai số góc điều khiển của khớp chủ động 1</i>	82
<b>Hình 5.27.</b> <i>Đồ thị kết quả điều khiển khớp chủ động 3</i>	83
<b>Hình 5.28.</b> <i>Phóng to kết quả tại vị trí đỉnh của góc chủ động 3</i>	83
<b>Hình 5.29.</b> <i>Đồ thị sai số góc điều khiển của khớp chủ động 3</i>	83
<b>Hình 5.30.</b> <i>Sai số tương đối của điều khiển bám quỹ đạo (%)</i>	84

## DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Tên bảng	Trang
<b>Bảng 4.1.</b> Mô phỏng các thành phần cơ khí của robot	51
<b>Bảng 4.2.</b> Giá trị các tham số của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do	54
<b>Bảng 4.3.</b> Kết quả so sánh giá trị trung bình bình phương các sai số tuyệt đối	60
<b>Bảng 4.4.</b> Kết quả so sánh giá trị trung bình các sai số tương đối	61
<b>Bảng 5.1.</b> Thông số của kit STM32F4 discovery	64
<b>Bảng 5.2.</b> Thông số kỹ thuật của MCP4921	67
<b>Bảng 5.3.</b> Chức năng các chân MCP4921	68
<b>Bảng 5.4.</b> Chức năng các bit dữ liệu của MCP4921	68
<b>Bảng 5.5.</b> Chức năng của các chân LM358	69
<b>Bảng 5.6.</b> Thông số của động cơ	71
<b>Bảng 5.7.</b> Thông số của driver SDGA	71
<b>Bảng 5.8.</b> Tên và chức năng các chân đấu nối giữa động cơ và driver	72
<b>Bảng 5.9.</b> Chức năng chân của kênh CN2	74
<b>Bảng 5.10.</b> Tên và chức năng các chân sử dụng ở kênh CN1	75
<b>Bảng 5.11.</b> Thông số cánh tay robot	78
<b>Bảng 5.12.</b> Thông số kỹ thuật của hộp số	78

## **DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT**

RRR	Revolute – Revolute – Revolut
DOF	Degree of freedom
P	Proportional
I	Integral
D	Derivative
RPDR	Rice Planar Delta Robot
NPD	Nonlinear PD
S-PI	Saturated proportional-integral
VSC	Variable Structure Control
SMC	Sliding Mode Control
FSMC	Fuzzy Sliding Mode Control
FLSD	Funy Logic Switching Devic
MLP	Multilayer perceptron
RBF	Radial Basis Function neural network
PNN	Polynomial neural networks
ANFIS	Adaptive-network-based fuzzy inference system
GMDH	Group method of data handling
MRA	Multiresolution analysis
CTC	Computed torque control
NCT	Nonlinear Computed torque
DNTSMC	Decoupled nonsingular terminal sliding mode controller
NN	Neural Network
BLM	Boundary layer method
AFC	Acceleration feedback control
DAF	Dynamic acceleration feedback
IDC	Inverse dynamics controller

## THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng

- Mã số: **KYTH - 17**

- Chủ nhiệm: PGS. TS. Lê Tiến Dũng

- Cơ quan chủ trì: Đại học Đà Nẵng

- Thời gian thực hiện: Từ tháng 01 năm 2017 đến tháng 12 năm 2018

### 2. Mục tiêu:

#### *a) Mục tiêu tổng quát:*

- Thiết kế được bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng.

#### *b) Mục tiêu cụ thể:*

- Xây dựng được các phương trình toán học mô tả động học, động lực học của tay máy robot song song phẳng có xét đến ma sát và các thành phần bất định để làm cơ sở thiết kế thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi.

- Xây dựng được các phương trình phân tích cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng. Để từ đó thiết kế được một vùng không gian làm việc của khâu chấp hành cuối của tay máy robot song song phẳng trong đó không có xảy ra cấu hình kỳ dị.

- Xây dựng được thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho robot song song phẳng khắc phục được những nhược điểm của các phương pháp hiện có về hiện tượng rung của tín hiệu điều khiển, giảm nhỏ sai số quỹ đạo dưới 3% và bền vững với các tác động của nhiễu loạn.

### **3. Tính mới và sáng tạo:**

Qua tổng hợp những công bố nghiên cứu tại Việt Nam hiện nay, có thể thấy chưa có cá nhân và đơn vị nào nghiên cứu về vấn đề điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng. Với yêu cầu rút ngắn khoảng cách trình độ nghiên cứu về tay máy robot trong nước và thế giới, thì cần phải có những nghiên cứu theo hướng mới, bắt kịp với sự phát triển của lĩnh vực điều khiển tay máy robot song song trên thế giới.

Đối với tình hình nghiên cứu trên thế giới, mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về điều khiển tay máy robot song song phẳng nhưng các bộ điều khiển đã đề xuất vẫn còn tồn tại những nhược điểm cần khắc phục. Bên cạnh đó, thuật toán điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song vẫn đang là một lĩnh vực mới, có nhiều vấn đề đang bỏ ngỏ cần nghiên cứu. Vì vậy việc nghiên cứu đề xuất thuật toán đồng bộ thích nghi là cần thiết để khắc phục những hạn chế của các thuật toán điều khiển hiện tại, nâng cao hơn nữa chất lượng điều khiển cho tay máy robot song song phẳng.

Trong đề tài này, nhóm thực hiện đã nghiên cứu đề xuất một thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới nâng cao chất lượng bám quỹ đạo cho robot song song phẳng. Thuật toán điều khiển mới được xây dựng dựa trên mô hình động lực học của tay máy robot, kết hợp giữa điều khiển đồng bộ với điều khiển thích nghi và có xét đến đầy đủ các sai số mô hình, các thành phần bất định cũng như các nhiễu loạn từ bên ngoài tác động lên robot. Như vậy, bộ điều khiển mà đề tài nghiên cứu đề xuất có tính mới và tính sáng tạo, khắc phục được các nhược điểm của các thuật toán điều khiển tay máy robot song song phẳng trước đó.

### **4. Kết quả nghiên cứu:**

Đề tài đã nghiên cứu, đề xuất được một bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho tay máy robot song song phẳng ở dạng tổng quát. Bộ điều khiển được xây dựng trên cơ sở kết hợp sử dụng phương pháp điều khiển đồng bộ, trong đó thực hiện các tính toán về sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo của các khớp chủ động,

kết hợp với thuật toán điều khiển tính mô-men, và điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo kết hợp với các bộ bù sai số. Kết quả của sự kết hợp này là bộ điều khiển mới có các ưu điểm như mang lại độ chính xác cao cho tay máy robot, giải quyết được vấn đề phức tạp của việc bù các thành phần bất định và nhiễu loạn từ bên ngoài. Trong bộ điều khiển đề xuất, tham số của mạng nơ-ron nhân tạo và đầu ra của các bộ bù sai số được chỉnh định online trong quá trình robot hoạt động để bù chính xác và thích nghi với các thành phần bất định cũng như nhiễu loạn từ bên ngoài. Sự ổn định của hệ thống kín được đảm bảo bằng chứng minh toán học dựa theo lý thuyết ổn định Lyapunov. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh sự hiệu quả của phương pháp. Bên cạnh đó, đề tài cũng thực hiện chế tạo thử nghiệm một mô hình và đạt được kết quả bước đầu khả quan.

## 5. Sản phẩm:

- 01 bài báo quốc tế thuộc danh mục SCIE:

[1] Quang Vinh Doan, Tien Dung Le, Quang Dan Le and Hee-Jun Kang, "A neural network–based synchronized computed torque controller for three degree-of-freedom planar parallel manipulators with uncertainties compensation." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15.2 (2018): 1729881418767307.

- 02 bài báo trên tạp chí trong nước:

[1] Lê Tiến Dũng, Lê Quang Dân, “Điều khiển đồng bộ tính mô-men cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 7(116).2017

[2] Dương Tấn Quốc, Lê Tiến Dũng, “Phân tích động học và các cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 5(114).2017-Quyển 1.

- 01 bài báo được đăng trong kỷ yếu Hội nghị quốc tế:

[1] Le, Tien Dung, and Quang Vinh Doan. "Fuzzy Adaptive Synchronized Sliding Mode Control Of Parallel Manipulators." *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*. ACM, 2018.

- 01 bài báo được đăng trong kỷ yếu Hội nghị trong nước:

[1] Lê Tiên Dũng, Đoàn Quang Vinh, Dương Tấn Quốc, “Thiết kế thuật toán Điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động”, *Kỷ yếu Hội nghị-Triển lãm quốc tế lần thứ 4 về Tự động hóa*, VCCA 2017, TP HCM.

- Đào tạo 01 Thạc sỹ bảo vệ thành công luận văn tốt nghiệp:

Dương Tấn Quốc, lớp K31.TĐH, chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa. Tên đề tài luận văn: “Thiết kế thuật toán điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do” dưới sự hướng dẫn của TS. Lê Tiên Dũng (Quyết định giao đề tài số 162/QĐ-ĐHBK-ĐT, quyết định bảo vệ số 1227/QĐ-ĐHBK-ĐT).

- Đào tạo 01 chuyên đề Tiến sĩ cho nghiên cứu sinh:

Nghiên cứu sinh Lê Ngọc Trúc, khóa 2016, ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Tên chuyên đề: “***Tham số hóa và mô phỏng tay máy công nghiệp sử dụng Blockset SimMechanics***”.

- Hướng dẫn 4 sinh viên bảo vệ xong đồ án tốt nghiệp đại học năm 2018:

1, Nguyễn Khánh Hiệu, Nguyễn Quyền Anh, lớp 13TDH1, tên đề tài: “Nhận dạng tham số động lực học và hệ số ma sát cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do RRR”, bảo vệ tháng 6/2018.

2, Trương Thanh Nguyên, Lê Thị Trang, lớp 13TDH1, tên đề tài: “Nghiên cứu bộ điều khiển đồng bộ và thực nghiệm trên mô hình tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR”, bảo vệ tháng 6/2018.

## **6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng:**

Thông qua việc thực hiện đề tài nghiên cứu đã góp phần nâng cao năng lực nghiên cứu khoa học tại Việt Nam trong lĩnh vực điều khiển tay máy robot song song. Kết quả nghiên cứu của đề tài là cơ sở để có thể tiếp tục mở rộng nghiên cứu và áp dụng thử nghiệm vào thực tế.

Báo cáo tổng kết các kết quả nghiên cứu là tài liệu tham khảo tốt cho các sinh viên, học viên cao học và nghiên cứu sinh chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, Cơ điện tử, Kỹ thuật điện. Kết quả nghiên cứu góp phần nâng cao chất lượng đào tạo, mở ra một hướng nghiên cứu chuyên sâu về lĩnh vực điều



khíên tay máy robot song song. Đây là một hướng nghiên cứu mới đang có tính thời sự, cấp thiết không chỉ trong nước mà cả trên thế giới.

Ngày 03 tháng 12 năm 2018

**Cơ quan chủ trì**

*(ký, họ và tên, đóng dấu)*

**Chủ nhiệm đề tài**

*(ký, họ và tên)*

## INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

### 1. General information:

Project title: **Research on designing of adaptive synchronized controller for planar parallel robotic manipulators**

Code number: **KYTH - 17**

Coordinator: Le Tien Dung

Implementing institution: The University of Danang

Duration: from 01<sup>st</sup> January 2017 to 30<sup>th</sup> December 2018

### 2. Objective(s):

#### *a) General objective:*

- Design of adaptive synchronized controller for planar parallel robotic manipulators.

#### *b) Detail objectives:*

- Built of mathematical equations of kinematics, dynamic model of planar parallel manipulator considering friction forces and uncertainties. Based on these equations, the adaptive synchronized controller for planar parallel robotic manipulators will be designed.

- Built of mathematical equations for singularity analysis of parallel robotic manipulators. Based on this, a workspace of end-effector without singularity will be designed.

- Developed new adaptive synchronized control algorithm for planar parallel robotic manipulators which overcome the disadvantages of previous methods about the chattering, reduce the error under 3% and robust with external disturbances.

### **3. Creativeness and innovativeness:**

Based on the current study published in Vietnam, there are no individuals or organizations that study adaptive synchronous controller for planar parallel robotic manipulators. With the need to shorten the research gap between Vietnam and developed countries, new research is needed in the the field of parallel manipulator control.

On the world, although there have been many studies in the field of control palanar parallel manipulators, proposed controllers still have shortcomings to overcome. In addition, synchronized control algorithm for parallel robotic manipulators is still a new field, there are many issues that need to be researched. Thus, the proposed study of adaptive synchronized control algorithms is necessary to overcome the limitations of the current control algorithms, to further improve the control quality for planar parallel robotic manipulators.

In this study, the research team proposed a new adaptive synchronized control algorithm that enhances the trajectory tracking control quality for planar parallel robotic manipulators. The new control algorithm is based on the dynamic model, combining synchronized control with adaptive control and taking full account of model errors, uncertainties of the robot. Thus, the proposed controller in this project has novelty and creativity, overcome the disadvantages of previous control algorithms for planar parallel robotic manipulators.

### **4. Research results:**

An adaptive synchronized computed torque control algorithm based on neural networks and error compensators has been proposed in this project. By integrating the definitions of synchronization error, cross-coupling error of active joints with an adaptive computed torque control algorithm, the results inherit the advantages of both methods, such as the high accuracy and low online computational burden. The proposed control algorithm handles the uncertainties and external disturbances by using a bank of neural networks and error

compensators. The weights of neural networks and error compensators are adaptively tuned online during the tracking trajectory of the parallel manipulator. The stability of the closed-loop control system is theoretically proven by the Lyapunov method. The results of computer simulations verified the effectiveness of the proposed control algorithm.

## **5. Products:**

- 01 SCIE paper:

[1] Quang Vinh Doan, Tien Dung Le, Quang Dan Le and Hee-Jun Kang, "A neural network–based synchronized computed torque controller for three degree-of-freedom planar parallel manipulators with uncertainties compensation." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15.2 (2018): 1729881418767307.

- 02 paper in national journal:

[1] Lê Tiến Dũng, Lê Quang Dân, “Synchornized Computed Torque Control for 3 DOF planar parallel robotic manipulators”, *Journal of Science and Technology – The University of Danang*, Volume 7(116).2017

[2] Dương Tấn Quốc, Lê Tiến Dũng, “Analysis of kinematics and singularities of 3 DOF planar parallel robotic manipulator”, *Journal of Science and Technology – The University of Danang*, Volume 5(114).2017- Issue 1.

- 01 paper in proceeding of international conference:

[1] Le, Tien Dung, and Quang Vinh Doan. "Fuzzy Adaptive Synchronized Sliding Mode Control Of Parallel Manipulators." *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*. ACM, 2018.

- 01 paper in proceeding of national conference:

[1] Lê Tiến Dũng, Đoàn Quang Vinh, Dương Tấn Quốc, “Design of Synchronized sliding mode control for 3 DOF planar parallel robotic manipulator in active joint space”, *Proceeding of The 4th Vietnam International Conference And Exhibition On Control And Automation, VCCA 2017*, Tp HCM.

- 01 master student who successfully defend his thesis:

Dương Tấn Quốc, K31.TĐH, major in Control Engineering and Automation. Name of thesis: “Design of synchronized control algorithm for 3 DOF planar parallel robotic manipulator” under the supervise of Dr. Lê Tiến Dũng (Decision number 162/QĐ-ĐHBK-ĐT, Thesis defend by decision number 1227/QĐ-ĐHBK-ĐT).

- Advise 01 research topic for PhD student:

PhD student name: Lê Ngọc Trúc, course 2016, major in Control Engineering and Automation, Hanoi University of Science and Technology. Research topic: *“Parameter identification and simulation of industrial robot arm using Blockset SimMechanics”*.

- Supervise 4 students who successfully defend their thesis on June 2018:

1, Nguyễn Khánh Hiệu, Nguyễn Quyền Anh, class 13TDH1, thesis topic: “Identification of dynamics and friction parameters for 3 DOF planar parallel robotic manipulator”.

2, Trương Thanh Nguyên, Lê Thị Trang, class13TDH1, thesis topic: “Research on synchronized controller and implement on hardware of 3 DOF planar parallel robotic manipulator.

## **6. Effects, transfer alternatives of reserach results and applicability:**

The research project has the contribution in improving the capacity of scientific research in Vietnam in the field of parallel robotic manipulator control. Research results are the basis for further expansion of the research content and application into practice.

The summary report of the research results is a useful for undergraduate students, graduate students in the field of Control Engineering and Automation, Mechatronics, Electrical Engineering. The research results have the contribution in improving the quality of training and education. This is a new research trend which is urgent not only in the Vietnam but also in the world.

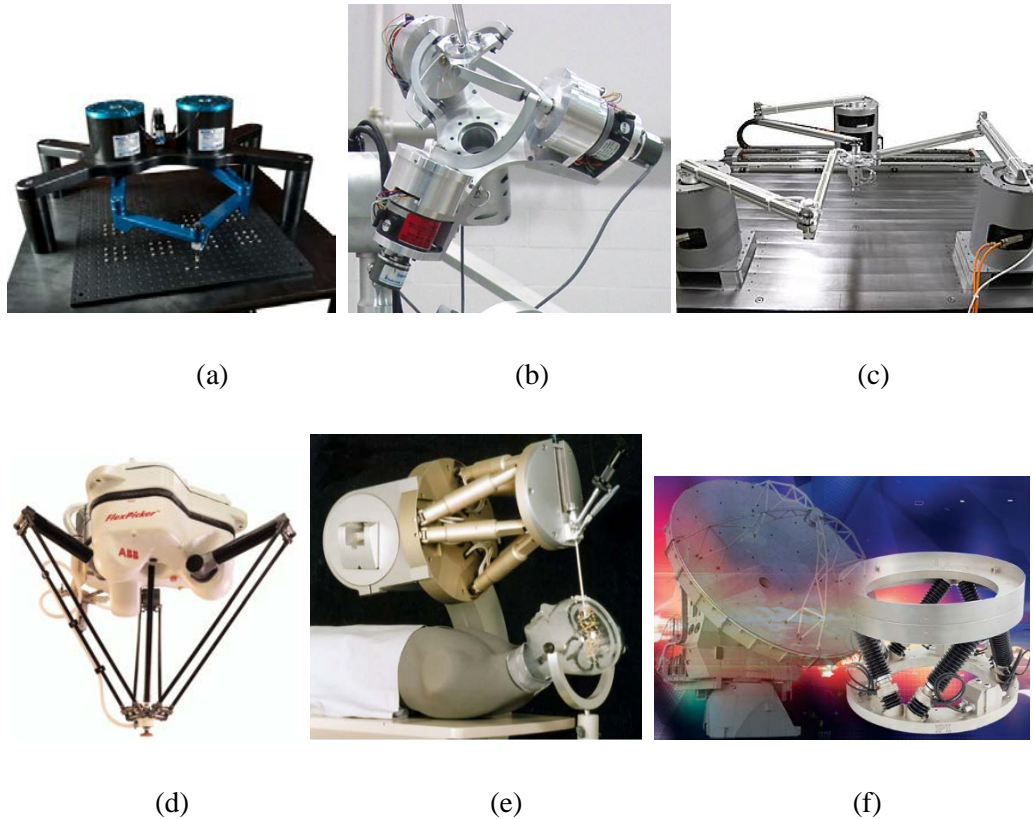
## **PHẦN MỞ ĐẦU**

### **TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI**

Tại Việt Nam, tay máy robot đã được triển khai trong các ngành sản xuất vật liệu xây dựng, luyện kim, chế tạo cơ khí, công nghiệp đóng tàu và một vài lĩnh vực khác. Trong chiến lược phát triển công nghiệp Việt Nam đến năm 2025, tầm nhìn 2035, chính phủ đã đặt mục tiêu giá trị sản phẩm công nghiệp công nghệ cao và sản phẩm ứng dụng công nghệ cao đến năm 2025 đạt khoảng 45% tổng GDP, sau năm 2025 đạt trên 50%. Trong đó, định hướng đến năm 2020 Việt Nam có thể nghiên cứu, thiết kế và sản xuất robot công nghiệp. Để làm được điều này, Việt Nam cần tập trung phát huy nghiên cứu phát triển, làm chủ công nghệ về robot - lĩnh vực trung tâm của cuộc cách mạng công nghệ lớn.

Hiện nay, yêu cầu về độ chính xác, tốc độ và độ cứng vững trong các ứng dụng gia công cơ khí chính xác cao, trong robot phẫu thuật y tế, robot giống người, trong các hệ thống mô phỏng chuyển động,... ngày càng cao. Các yêu cầu công nghệ này không thể đáp ứng được khi sử dụng các loại robot nối tiếp truyền thống. Nhằm đáp ứng các yêu cầu trên, trong những năm gần đây, loại tay máy robot song song đã thu hút nhiều nhà khoa học, nhiều tổ chức nghiên cứu. Vấn đề thiết kế, chế tạo và điều khiển các loại tay máy robot song song trở thành vấn đề cấp thiết, có tính thời sự trong cộng đồng nghiên cứu cũng như sản xuất robot công nghiệp trên thế giới cũng như tại Việt Nam.

Một số mô hình và ứng dụng của tay máy robot song song được thể hiện như trên Hình I. Như đã phân tích tổng quan ở mục 10, tay máy robot song song có những ưu điểm vượt trội như có tốc độ cao, độ cứng vững lớn, độ chính xác rất cao, khả năng chịu được tải trọng lớn và mô-men quán tính bé hơn hẳn các loại tay máy robot nối tiếp truyền thống. Tuy nhiên, việc điều khiển tay máy robot song song gặp nhiều khó khăn và thách thức do mô hình động lực học phức tạp, nhiều cấu hình kỳ dị và sự giới hạn về không gian làm việc.



**Hình 1.** Một số tay máy robot song song: *(a)* Tay máy song song DexTAR (ÉTS, Montreal, Canada); *(b)* Tay máy song song 3 bậc tự do (Đại học Western Ontario); *(c)* Tay máy song song phẳng 3 bậc tự do (Viện cơ điện tử, đại học Leibniz); *(d)* Tay máy FlexPicker IRB 340 của hãng ABB; *(e)* Robot phẫu thuật (Viện công nghệ và Tự động hóa - IPA) and *(f)* Tay máy 6 bậc ALMA điều khiển chuyển động kính thiên văn.

Trong các loại tay máy robot song song thì loại tay máy robot song song phẳng có những đặc thù riêng, có nhiều ứng dụng trong thực tiễn và được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Trong đó, vấn đề điều khiển bám quỹ đạo có tính thiết yếu bởi vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả và khả năng hoạt động của robot. Gần đây, phương pháp điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng được chú trọng phát triển bởi ưu điểm về việc xét đến ảnh hưởng động học giữa các khớp có gắn cơ cấu truyền động (*active joints*). Điểm khác biệt giữa thuật toán điều khiển đồng bộ và thuật toán điều khiển phản hồi truyền thống là việc đề xuất một đại lượng gọi là sai số đồng bộ. Sai số này khác với sai số về quỹ đạo thông thường và có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác bám quỹ đạo của robot. Thuật toán điều khiển đồng bộ được đề xuất đầu tiên bởi Y. Koren cho

việc điều khiển một máy công cụ 2 trục. Sau đó, một số công trình khác đã phát triển và ứng dụng thuật toán này trong điều khiển chuyển động cho các máy công cụ nhiều trục, cho hệ thống gồm nhiều tay nối tiếp phối hợp làm việc, cho hệ thống nhiều robot và gần đây là cho tay máy robot song song.

Qua tổng hợp những công bố nghiên cứu tại Việt Nam hiện nay, có thể thấy chưa có cá nhân và đơn vị nào nghiên cứu về vấn đề điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng. Với yêu cầu rút ngắn khoảng cách trình độ nghiên cứu về tay máy robot trong nước và thế giới, thì cần phải có những nghiên cứu theo hướng mới, bắt kịp với sự phát triển của lĩnh vực điều khiển tay máy robot song song trên thế giới. Việc thực hiện nghiên cứu đề xuất thuật toán đồng bộ thích nghi là cần thiết để khắc phục những hạn chế của các thuật toán điều khiển hiện tại, nâng cao hơn nữa chất lượng điều khiển cho tay máy robot song song phẳng.

Trong đề tài này, nhóm thực hiện nghiên cứu đề xuất một phương pháp điều khiển đồng bộ thích nghi mới nhằm nâng cao chất lượng bám quỹ đạo cho robot song song phẳng. Trước hết các mô hình và cơ sở lý thuyết cho các vấn đề cần nghiên cứu được xây dựng. Sau đó các phương pháp điều khiển dựa theo mô hình của tay máy robot song song phẳng hiện có được đánh giá và chỉ ra những tồn tại, hạn chế. Dựa trên những kết quả này, thuật toán điều khiển mới được xây dựng dựa trên mô hình động lực học của tay máy robot, kết hợp giữa điều khiển đồng bộ với điều khiển thích nghi và có xét đến đầy đủ các sai số mô hình, các thành phần bất định cũng như các nhiễu loạn từ bên ngoài tác động lên robot. Thuật toán điều khiển mà đề tài nghiên cứu đề xuất có tính mới, khắc phục được các nhược điểm của các thuật toán điều khiển tay máy robot song song phẳng trước đó, đủ hàm lượng khoa học để công bố bằng bài báo trên tạp chí quốc tế thuộc SCIE. Kết quả của đề tài sẽ góp phần hoàn thiện kỹ thuật điều khiển bám quỹ đạo cho tay máy robot song song phẳng, rút ngắn trình độ về KH&CN trong nước và quốc tế.



## MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

### *a) Mục tiêu tổng quát:*

- Thiết kế được bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng.

### *b) Mục tiêu cụ thể:*

- Xây dựng được các phương trình toán học mô tả động học, động lực học của tay máy robot song song phẳng có xét đến ma sát và các thành phần bất định để làm cơ sở thiết kế thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi.

- Xây dựng được các phương trình phân tích cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng. Để từ đó thiết kế được một vùng không gian làm việc của khâu chấp hành cuối của tay máy robot song song phẳng trong đó không có xảy ra cấu hình kỳ dị.

- Xây dựng được thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho robot song song phẳng khắc phục được những nhược điểm của các phương pháp hiện có về hiện tượng rung của tín hiệu điều khiển, giảm nhỏ sai số quỹ đạo dưới 3% và bền vững với các tác động của nhiễu loạn.

## ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI NGHIÊN CỨU

### **a) Đối tượng nghiên cứu**

- Mô hình động lực học dạng tổng quát cho một tay máy robot song song phẳng có  $n$  bậc tự do.
- Mô hình mô tả động học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do. Các phương pháp phân tích, tìm kiếm vùng không gian làm việc tối ưu và loại trừ các cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do.
- Phương pháp điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng.

### **b) Phạm vi nghiên cứu**

Đề tài này giới hạn phạm vi nghiên cứu cho tay máy robot song song phẳng, là loại tay máy hoạt động trên một mặt phẳng của hệ tọa độ Đề-các. Đối với loại tay máy này thì tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do RRR (sử dụng các

khớp xoay) là một trường hợp điển hình có thể áp dụng để kiểm nghiệm cho các kết quả nghiên cứu. Trong đề tài, giả thiết các biến khớp và tốc độ của biến khớp là đo được và đưa phản hồi về bộ điều khiển chuyển động của robot. Giả thiết các thành phần bất định như sai số mô hình, các lực ma sát và nhiễu loạn từ bên ngoài là hữu hạn và bị chặn trên. Các giả thiết này đều phù hợp và sát với thực tế.

## **CÁCH TIẾP CẬN, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

### **a) Cách tiếp cận**

- Khảo sát các kết quả nghiên cứu đi trước trong lĩnh vực liên quan.
- Kế thừa các kết quả của các đề tài, công trình khoa học đã thực hiện của chủ nhiệm đề tài và các thành viên đề tài.
- Tổng hợp, phát triển cơ sở lý thuyết, phân tích các mô hình toán học để từ đó đề xuất giải pháp thiết kế thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho tay máy robot song song phẳng.
- Mô phỏng các thành phần cơ khí của tay máy robot trên các phần mềm chuyên dụng, sát với thực tiễn, thay thế cho mô hình thật và có thể sử dụng để kiểm nghiệm giải pháp đề xuất.
- Mô phỏng kiểm nghiệm.
- Phân tích ổn định, đánh giá các kết quả.

### **b) Phương pháp nghiên cứu**

- Xem xét các vấn đề nghiên cứu liên quan, nghiên cứu tổng quan, so sánh và đánh giá các ưu điểm, khuyết điểm của các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo khác nhau cho tay máy robot song song phẳng để từ đó đề xuất ý tưởng cải tiến nhằm nâng cao chất lượng.
- Sử dụng các công cụ toán học phù hợp để xây dựng các mô hình toán học phục vụ cho mục đích phân tích, thiết kế tối ưu động học và xây dựng mô hình động lực học làm cơ sở thiết kế thuật toán điều khiển mới.
- Sử dụng các công cụ phần mềm: Phần mềm Solidworks để xây dựng chính xác mô hình của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do RRR sát với thực tiễn; phần mềm Matlab-Simulink để lập trình, mô phỏng kiểm nghiệm thuật toán.

- Thiết kế thuật toán điều khiển và thực hiện các thử nghiệm trên mô hình mô phỏng.
- Áp dụng các lý thuyết ổn định để phân tích và xác định miền ổn định của hệ thống điều khiển.
- Kiểm tra độ chính xác của kết quả điều khiển bám quỹ đạo và đánh giá chất lượng điều khiển dựa trên việc phân tích các dữ liệu kết quả.

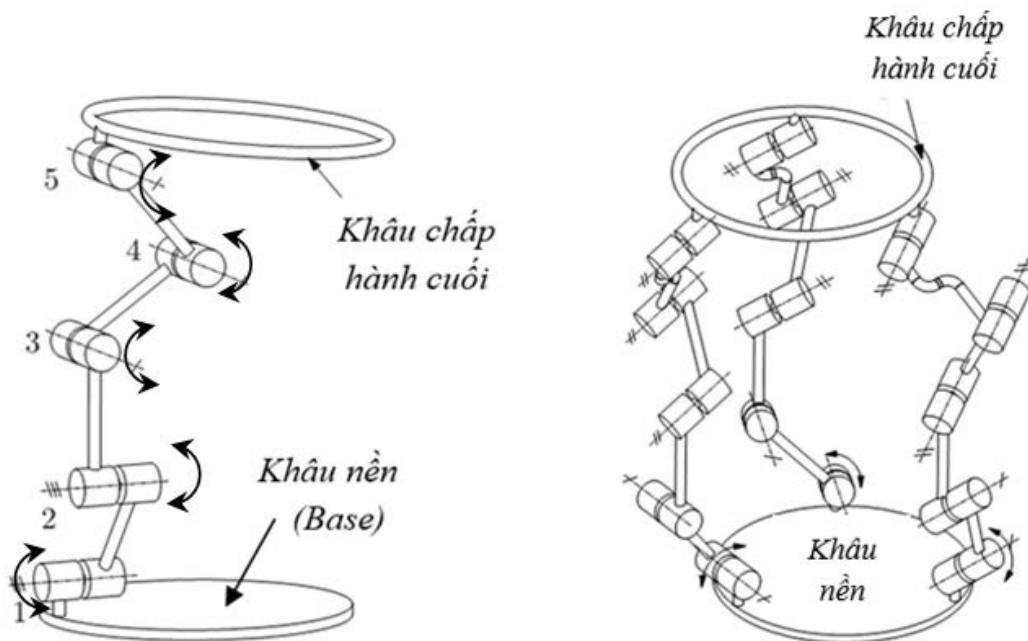
## CHƯƠNG 1

### TỔNG QUAN VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG

#### 1.1. GIỚI THIỆU CHUNG

Tay máy robot công nghiệp đóng một vai trò quan trọng trong rất nhiều các hệ thống sản xuất tự động hóa. Đặc biệt, chúng rất phù hợp để làm việc trong các môi trường nguy hiểm, độc hại hoặc trong môi trường chân không nơi mà con người không thể có mặt.

Nhìn dưới góc độ cấu trúc hình học, có 2 loại tay máy robot phổ biến đó là *tay máy robot nối tiếp* (còn gọi là *tay máy robot có cấu trúc hở*) và *tay máy robot song song* (còn gọi là *tay máy robot có cấu trúc kín*). Một tay máy robot được gọi là nối tiếp hoặc cấu trúc hở nếu như từ khâu nền (*base*) đến khâu chấp hành (*end-effector*) được liên kết với nhau bằng chỉ một chuỗi động học nối tiếp (**Hình 1.1a**). Mặt khác, một tay máy robot được gọi là song song hoặc cấu trúc kín nếu như khâu chấp hành cuối được liên kết với khâu nền (*base*) bằng một số các chuỗi động học nối tiếp tạo thành cấu trúc khép kín (**Hình 1.1b**).



**Hình 1.1.** Cấu trúc hình học của robot nối tiếp và song song  
a) Cấu trúc chuỗi động học hở của robot nối tiếp  
b) Cấu trúc chuỗi động học kín của robot song song

Trong 2 loại tay máy robot kể trên thì tay máy robot nối tiếp có lịch sử phát triển khá dài và đã được sử dụng rất phổ biến trong thực tiễn bởi những ưu điểm về không gian làm việc lớn và sự linh hoạt khéo léo giống như cánh tay của con người. Tay máy robot nối tiếp đã được nghiên cứu rộng rãi và đã có rất nhiều các nghiên cứu, các tài liệu được công bố, phổ biến. Tuy nhiên, tay máy robot nối tiếp có những hạn chế như độ chính xác thấp khi hoạt động ở tốc độ cao, khả năng mang tải bị hạn chế, mô-men quán tính lớn, bị dao động ở tốc độ cao và khả năng gia tốc thấp. Tóm lại, tay máy robot nối tiếp có những ưu điểm và nhược điểm giống như một cánh tay của con người. Vì vậy, với những ứng dụng yêu cầu khả năng mang tải lớn, yêu cầu lực tác động của khâu chấp hành lớn, yêu cầu độ chính xác cao cùng với tốc độ nhanh thì tay máy robot nối tiếp không đáp ứng được. Khi đó, tay máy robot song song được sử dụng như một giải pháp thay thế cho những yếu điểm của tay máy robot nối tiếp truyền thống.

Ngược lại với tay máy robot nối tiếp, tay máy robot song song mới xuất hiện và được quan tâm nghiên cứu trong vài thập kỷ gần đây. Trong tay máy robot song song, mỗi chuỗi động học thường chỉ có một khớp được truyền động (gọi là *khớp chủ động*), các khớp còn lại không được truyền động (gọi là *khớp thụ động*). Tất cả các trục chuyển động sẽ tác động trực tiếp hoặc gián tiếp lên khâu chấp hành cuối cần chuyển động. Để thực hiện một chuyển động theo ý muốn thì tất cả các khớp chủ động đều phải hoạt động. Như vậy sẽ xuất hiện chuỗi động học được gọi là động học kín - mà ở đó độ cứng của từng chuỗi riêng lẻ có tác dụng song song. Trong kết cấu song song này của tay máy robot, mỗi chuỗi động học chỉ nhận được đúng một động lực, cho nên số lượng của chuỗi khớp nối đúng bằng bậc tự do của tay máy robot song song. Với đặc điểm cấu trúc này, tay máy robot song song có những ưu điểm như có tốc độ cao, độ cứng vững lớn, độ chính xác rất cao, khả năng chịu được tải trọng lớn và mô-men quán tính bé. Tuy vậy, tay máy robot song song có những nhược điểm như không gian làm việc nhỏ, phương trình động học có nhiều ràng buộc giữa các chuỗi do cấu trúc khép kín,

nhiều cấu hình kỳ dị và mô hình động lực học phức tạp. Chính những nhược điểm này làm cho việc nghiên cứu đề xuất các thuật toán để điều khiển hoạt động của tay máy robot song song gặp nhiều thách thức.

Trong các loại tay máy robot song song thì loại tay máy robot song song phẳng có ưu điểm đơn giản, có những đặc thù riêng và nhiều ứng dụng trong thực tiễn cho những điều khiển chuyển động trên mặt phẳng. Chính vì vậy, tại Việt Nam cũng như trên thế giới có nhiều nhà khoa học, nhiều công ty, trường đại học đã thực hiện các công trình nghiên cứu về điều khiển tay máy robot song song phẳng.

## **1.2. TỔNG QUAN VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG TRÊN THẾ GIỚI**

Vấn đề điều khiển tay máy robot song song phẳng đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới để nghiên cứu nâng cao thể mạnh của chúng. Có thể chia các phương pháp điều khiển truyền thống cho tay máy robot song song phẳng đã công bố thành 2 nhóm chính: *Phương pháp điều khiển dựa theo sai số* và *Phương pháp điều khiển dựa theo mô hình*. Đối với nhóm phương pháp thứ nhất, có thể kể đến các công trình điển hình như điều khiển đồng bộ lồi (convex synchronized control) [1], điều khiển PD, PID phi tuyến [2, 3] và điều khiển chuyển mạch thích nghi [4] đã được đề xuất cho tay máy robot song song phẳng. Các bộ điều khiển này có ưu điểm đơn giản và dễ thực hiện nhưng chúng không mang lại chất lượng điều khiển tốt bởi vì chúng chỉ được thiết kế dựa trên sai số về động học, còn các thành phần động lực học của robot không được tính đến để bù. Để đạt được chất lượng điều khiển robot tốt nhất, các phương pháp điều khiển phải được thiết kế với sự phân tích và xét đến các yếu tố động lực học của robot. Hay nói cách khác, các thành phần động lực học của robot phải được bù đầy đủ trong bộ điều khiển. Các bộ điều khiển này thuộc nhóm phương pháp điều khiển dựa theo mô hình (Model-based controller). Tuy nhiên, vấn đề phân tích động lực học cũng như việc thiết kế các bộ điều khiển dựa theo mô hình động lực học của tay máy robot song song gặp nhiều khó khăn do sự tồn tại của các cấu trúc động học kín và các cấu hình kỳ dị. Các công trình nghiên cứu thiết kế

bộ điều khiển dựa theo mô hình cho robot song song đã được công bố như bộ điều khiển phi tuyến dựa theo mô hình [5-7], điều khiển tính mô-men [8], bộ điều khiển bền vững [9], điều khiển trượt ứng dụng mạng neural [10] và bộ điều khiển thích nghi [11].

Một số thuật toán điều khiển điển hình được trình bày chi tiết như sau:

### 1.2.1. Thuật toán điều khiển PD kết hợp bù trọng lực

Năm 2000, Fathi H. Ghorbel [2] cùng cộng sự của mình đưa ra công bố của mình về việc mô hình hóa và kiểm soát vị trí của chuỗi cơ học khớp kín. Trong đó, Ghorbel chứng minh được sự ổn định tiệm cận của thuật toán PD bù trọng lực đơn giản và được thực nghiệm trên robot detail song phẳng rice (The Rice Planar Delta Robot (RPDR)).

Ghorbel đã thực hiện 2 thực nghiệm:

- Chuyển động từ điểm tới điểm để tính toán các thông số của PD với luật kiểm soát bù trọng lực đơn giản, luật điều khiển được viết như sau:

$$\mathbf{u} = \mathbf{g}(\mathbf{q}^d) + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}^d - \mathbf{q}) - \mathbf{K}_v\dot{\mathbf{q}} \quad (1.1)$$

với  $\mathbf{g}(\mathbf{q}^d)$  là các vectơ trọng lực mong muốn,  $\mathbf{q}$  là vectơ góc của các khớp

Ở thực nghiệm này ma sát Coulomb đã được bù ở cấu hình mong muốn. Dựa vào kết quả thử nghiệm và mô phỏng có thể thấy rằng robot đạt được mục tiêu mong muốn trong khoảng 0,3s.

- Chuyển động từ điểm đến điểm được lặp đi lặp lại giữa cấu hình ban đầu và cấu hình cuối. Với thực nghiệm này, các điều kiện và thực hiện bù ma sát giống với thí nghiệm đầu, nhưng áp dụng thuật toán điều khiển khác- các bước di chuyển được lặp đi lặp lại giữa vị trí đầu và cuối để có thời gian chờ để đáp ứng ổn định, thì kết quả cho thấy robot hoàn thành chuyển động dưới 0,3 s và đạt được cấu hình mong muốn trong phạm vi dung sai hợp lý. Qua 2 thực nghiệm trên cho thấy bộ điều khiển đã đáp ứng được yêu cầu đặt ra. Tuy nhiên, thời gian đáp ứng vẫn còn lâu và giá trị phản hồi từ các tay máy có thể không được chính xác do các thiết bị đo gây ra sai lệch trong quá trình điều khiển.

Mặc dù điều khiển PD và PD bù ma sát thường đủ để điều khiển một tay robot, nhưng các yêu cầu về điều khiển năng suất cao với các thay đổi trong điều kiện vận hành hoặc thay đổi các tham số môi trường thường vượt quá khả năng điều khiển PD cố định đơn giản.

### 1.2.2. Điều khiển PD, PID phi tuyến

Năm 2006, P. R. Ouyang và cộng sự [3] đã đề xuất bộ điều khiển PD phi tuyến (Nonlinear PD- NPD) kiểm soát các hệ thống thao tác song song đa cấp tự do cho nhiệm vụ chung, tức là theo dõi quỹ đạo và để kiểm tra cấu trúc cơ học của tay máy ảnh hưởng đến hiệu năng động. Bộ điều khiển PD phi tuyến có cấu trúc điều khiển:

$$\mathbf{T}(t) = \mathbf{K}_p(.)\mathbf{e}(t) + \mathbf{K}_d(.)\dot{\mathbf{e}}(t) \quad (1.2)$$

Trong đó  $\mathbf{T}(t)$  là vector mô-men xoắn điều khiển được tạo ra bởi bộ điều khiển;  $\mathbf{K}_p(.)$  và  $\mathbf{K}_d(.)$  là các ma trận đặt và được khi P,D thay đổi theo thời gian;  $\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}^d(t) - \mathbf{q}(t)$  đại diện cho vector sai số. Các chức năng sau của độ lợi phi tuyến được sử dụng:

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_{po} * \mathbf{K}(t), \mathbf{K}_d = \mathbf{K}_{do} * \mathbf{K}(t) \quad (1.3)$$

Độ lợi phi tuyến cho phép bộ điều khiển điều chỉnh phản ứng của nó dựa trên hiệu suất của hệ thống điều khiển kín. Khi sai số giữa giá trị mong muốn và thực tế của biến được kiểm soát lớn, độ lợi khuếch đại giá trị sai số để tạo ra một hành động khắc phục nhanh chóng đưa hệ thống đến mục tiêu của nó. Khi sai số giảm đi, độ lợi được tự động giảm để tránh dao động quá mức và vượt quá lớn giá trị kiểm soát. Trong công bố này, Ouyang đã áp dụng 2 bộ điều khiển PD và bộ điều khiển PD phi tuyến lên robot 2-DOF. Kết quả cho thấy, các sai số theo dõi quỹ đạo sử dụng bộ điều khiển NPD giảm đáng kể so với các bộ điều khiển PD cố định thông thường. Một ưu điểm khác cho bộ điều khiển NPD là ít nhạy với độ trễ hơn so với chế độ trượt và điều khiển PD có độ lợi cố định. Như vậy, bộ điều khiển NPD có thể theo dõi sai lệnh vượt trội và hiệu quả trong việc loại bỏ nhiễu hơn so với bộ điều khiển PD cố định tuyến tính.



### 1.2.3. Điều khiển mờ trượt

Năm 1995 Philippe BÉGON [12] đã đưa ra một bộ điều khiển trượt mờ cho robot song song. Theo công bố của ông, kiểm soát động lực học không phải là cách tốt để có được hiệu suất chắc chắn nhất, đặc biệt là khi tải trọng chưa được biết. Hơn nữa, loại luật kiểm soát này không thể bù đắp cho ma sát Coulomb. Nên BÉGON và cộng sự dựa trên điều khiển cấu trúc biến đổi (Variable Structure Control- VSC) với chế độ trượt, nhưng VSC không ổn định cho các hệ thống lấy mẫu. Do đó, bộ điều khiển Logic mờ được sử dụng để thực hiện kiểm soát chế độ mờ trượt (Fuzzy Sliding Mode Control-FSMC) trên rô-bốt song song 6 bậc tự do.

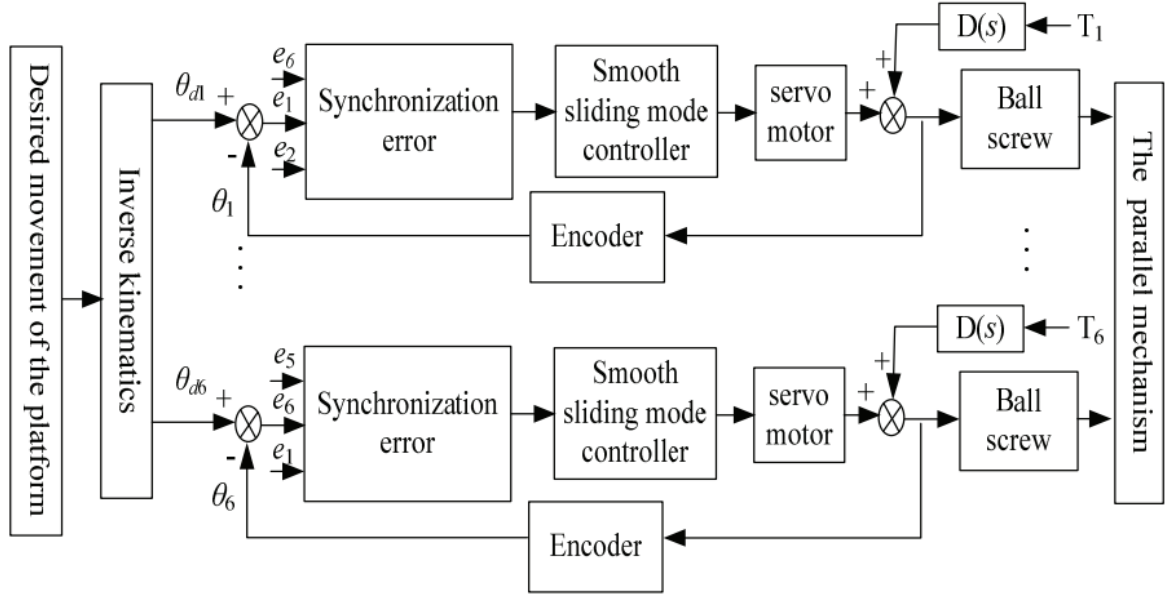
Các mô phỏng chứng minh hệ thống đang ở chế độ trượt, và thiết bị FSMC của bộ điều khiển ổn định khi quán tính của động cơ thay đổi (điều này được thực hiện bằng cách tăng đáp ứng thời gian T trong mô hình). Với mục đích đó, họ đã đưa ra các mô phỏng các bước đáp ứng và quan sát trạng thái của hệ thống trong mặt phẳng trượt. Các kết quả thử nghiệm mà BÉGON cùng cộng sự có được với bộ điều khiển FSMC được so sánh với kết quả của một bộ điều khiển PI. Dựa vào kết quả thu được có thể kết luận là bộ điều khiển chế độ trượt mờ là tốt và ổn định hơn so với điều khiển PI. Tuy nhiên, vẫn còn một số vấn đề như độ ổn định: vì độ lớn của đầu vào điều khiển được xác định bởi các quy tắc mờ, rất khó để đảm bảo rằng các điều kiện ổn định được thỏa mãn và việc thiết kế các thông số của bộ điều khiển mờ cần phụ thuộc rất nhiều vào kinh nghiệm của con người.

Năm 2013, Guoqin Gao và đồng sự [13] đã cải tiến bộ điều khiển mờ trượt của BÉGON bằng cách đưa ra sai số đồng bộ được xác định trong điều khiển trượt. Trong công trình nghiên cứu này, đối với cơ chế song song loại 6 - DOF PTRT, một bộ điều khiển chế độ trượt tron mới dựa trên sai số đồng bộ được đề xuất sau khi phân tích ghép nối. Sơ đồ khối của bộ điều khiển này được thể hiện trên Hình 1.2.

Theo lý thuyết thiết kế điều khiển trượt, sai số đồng bộ và mặt trượt được viết như sau:

$$s_s = \sum_{j=1}^{n-1} c_j e_s^{j-1} + e_s^{n-1} \quad (1.4)$$

với  $e_s$  là sai số đồng bộ,  $c_j$  là các hằng số dương có thể điều chỉnh được. Bộ điều khiển trượt đồng bộ được thiết kế phải thỏa mãn điều kiện trượt  $s_s \dot{s}_s \leq 0$



**Hình 1.2.** Hệ thống điều khiển theo thuật toán trượt đồng bộ cho cơ cấu song song

Và luật điều khiển mà bài báo đề xuất có thể được viết như sau:

$$u = \frac{1}{g(x)} \left[ \sum_{j=1}^{n-1} c_j e_s^{j-1} + x_d^{(n)} - f(x) + re_{i-1}^{n-1} - re_{i+1}^{n-1} \right] + \gamma s_s \quad (1.5)$$

trong đó trong đó  $\gamma$  là hằng số dương có thể điều chỉnh được,  $s_s$  là hàm trượt được xác định trước và  $\gamma s_s$  được sử dụng để khắc phục hiệu ứng ghép nối hệ thống và các sai số khác. Và độ ổn định hệ thống được chứng minh trong Định lý ổn định Lyapunov. Các kết quả mô phỏng của hệ thống cơ chế song song 6 - PTRT cho thấy: Điều khiển chế độ trượt đồng bộ được đề xuất trong công trình này có thời gian đáp ứng ngắn hơn và độ chính xác điều khiển cao hơn khi so sánh với điều khiển trượt truyền thống.

## CHƯƠNG 2

### XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

#### 2.1. GIỚI THIỆU

Phân tích và xây dựng mô hình động lực học của tay máy robot song song là một bài toán phức tạp do đặc điểm cấu tạo nhiều vòng động học khép kín và nhiều cấu hình kỳ dị của loại robot này. Vì vậy, so với trường hợp tay máy robot nối tiếp, có ít các công trình khoa học đề cập đến việc xây dựng mô hình động lực học tổng quát cho tay máy robot song song, đặc biệt là đối với trường hợp tay máy robot song song phẳng.

Wittenburg là một trong những nhà khoa học đầu tiên đưa ra các phương trình mô tả động lực học của các cơ cấu động học khép kín trong các công trình [14, 15] dựa trên sự dịch chuyển của một hệ động học hở tương đương (*equivalent open-chain system*). Các phương trình này được xây dựng bằng cách giả thiết các “phép cắt ảo” để bỏ đi các liên kết vật lý của các chuỗi động học khép kín, cho đến khi hệ chỉ còn các chuỗi động học hở. Sau đó, mô hình động lực học của cơ cấu động học kín được dẫn dắt từ các phương trình mô tả động lực học của hệ động học hở tương đương áp dụng phương trình Lagrange có tồn tại các toán tử Lagrange xét đến sự ràng buộc động học, rồi sau đó tìm cách khử các toán tử Lagrange này. Phương pháp do Wittenburg đề xuất có sử dụng đến khái niệm cấu trúc hình cây và nguyên lý dịch chuyển D’Alembert. Tuy nhiên, phương pháp này khó áp dụng do sự phức tạp trong các phương trình toán học và đòi hỏi một khối lượng tính toán lớn.

Trong công trình [16], Luh và Cheng đã cải tiến phương pháp tính toán trên của Wittenburg để xây dựng mô hình động lực học ngược cho các tay máy robot có cấu trúc động học kín. Trong đó, một phương pháp tính lặp dựa trên các phương trình Newton-Euler đã được đề xuất để tính toán các lực đầu vào của tay máy robot để truyền động cho hệ động học hở tương đương.

Trong một nghiên cứu khác, Murray [17] đã áp dụng nguyên lý D'Alembert để xây dựng mối quan hệ giữa vector của các lực truyền động tổng thể (tất cả các khớp của robot) của hệ động học hở tương đương và vector của các lực truyền động cho các khớp chủ động của hệ động học kín. Các vector lực truyền động tổng thể tương ứng với các mô-men truyền động tại các khớp của hai hệ thống tương đương, được biểu diễn bằng một mối quan hệ tuyến tính đơn giản tương đương với phép biến đổi qua lại giữa 2 hệ thống. Với ý tưởng tương tự, dựa trên nguyên lý D'Alembert, Nakamura [18] cũng đề xuất một thuật toán xây dựng mô hình động lực học ngược của các cơ cấu động học khớp kín không thừa bậc và thừa bậc mà không cần sử dụng đến các toán tử Lagrange. Để tính đến sự ràng buộc của cấu trúc động học kín, một ma trận Jacobian của phép biến đổi các biến khớp thụ động theo các biến khớp chủ động được sử dụng thay cho các toán tử Lagrange. Ở các công trình nghiên cứu khác [19-21], Ghorbel phát triển mô hình động lực học cho các cấu trúc cơ khí động học kín bằng cách rút gọn mô hình trong hệ tọa độ toàn cục độc lập. Tuy nhiên mô hình động lực học xây dựng được ở dạng không tường minh.

Trong công trình nghiên cứu [22], Nakamura định nghĩa lại phương pháp của ông đã công bố trước đây để phát triển một thuật toán tính mô hình động lực học cho một cấu trúc động học kín tổng quát bất kỳ. Tiếp tục phát triển hơn nữa, C. Hui và Y. Yiu-Kuen đã kết hợp sử dụng phương pháp Lagrange và nguyên lý D'Alembert để đề xuất một phương pháp đơn giản và trực tiếp để tính toán mô hình động lực học của tay máy robot song song trong cả trường hợp có hoặc không có thừa bậc [23, 24].

Sau khi tổng quan lại các công trình nghiên cứu đi trước, chúng ta thấy có những cách tiếp cận cơ bản sau đây để xây dựng mô hình động lực học của tay máy robot song song: Phương pháp sử dụng các phương trình Newton-Euler để phân tích lực, phương pháp Lagrange, nguyên lý D'Alembert và nguyên lý dịch chuyển khả dĩ. Để xây dựng mô hình động lực học của một tay máy robot song song ở dạng tổng quát, sẽ cần 3 bước sau đây:

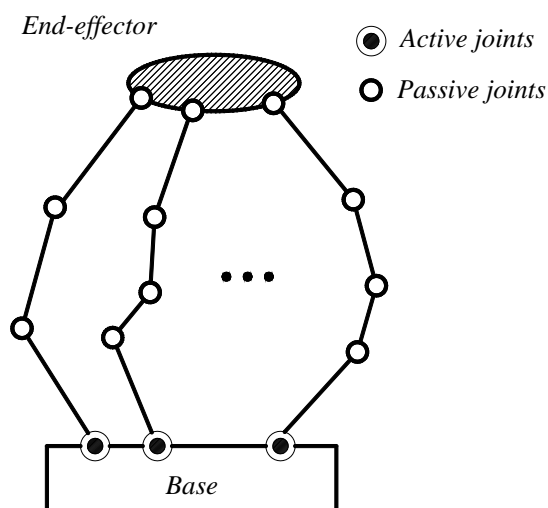
1. Cấu trúc động học kín được chuyển thành một cấu trúc động học hở tương đương bằng cách giả thiết các nhất “cắt ảo” tại các khớp liên kết của cơ cấu động học kín cho đến khi không còn vòng kín nào. Các khớp thụ động lúc đó đều được xem là các khớp chủ động với các “cơ cấu truyền động ảo”.

2. Mô hình động lực học được tính toán cho cấu trúc động học hở với tất cả các “cơ cấu truyền động ảo” tại các khớp thụ động và các cơ cấu truyền động thật tại các khớp chủ động. Chuyển động của hệ hở tương đương với chuyển động của hệ kín ban đầu.

3. Chuyển mô hình động lực học của hệ sang trên hệ quy chiếu chỉ gắn với các khớp chủ động (đưa về hệ kín ban đầu) bằng cách xét đến các mối ràng buộc về động học vào mô hình.

## 2.2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CHO MỘT TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG DẠNG TỔNG QUÁT

Chúng ta xét một tay máy robot song song được tạo thành từ một số chuỗi động học nối tiếp gồm các thanh liên kết cứng và các khớp như minh họa ở Hình 2.1.



**Hình 2.1.** Một tay máy robot song song dạng tổng quát

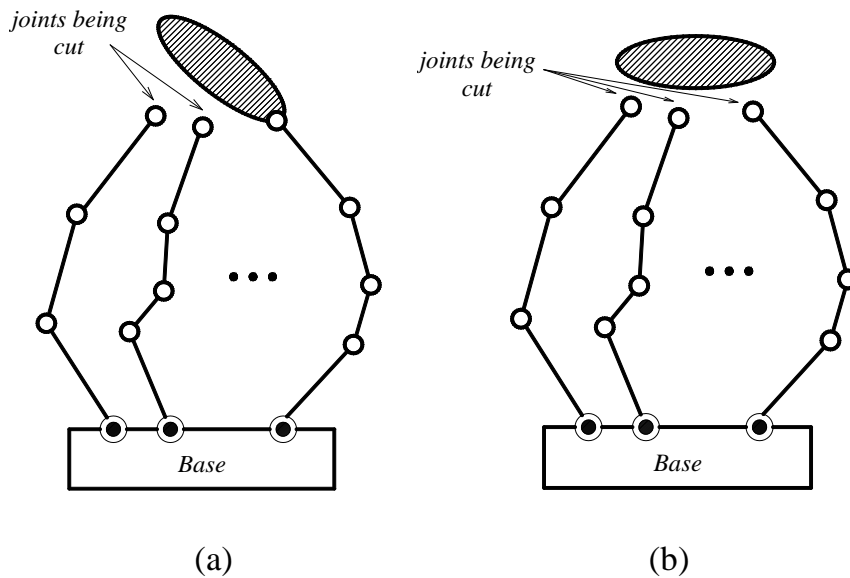
Đặt:

- $N_a$  là số khớp chủ động

- $\theta_a \in \mathbb{R}^{N_a}$  là vector biến khớp chủ động
- $\tau_a \in \mathbb{R}^{N_a}$  là vector của mô-men truyền động tại các khớp chủ động
- $N_p$  là số khớp bị động
- $\theta_p \in \mathbb{R}^{N_p}$  là vector biến khớp thụ động.

Các khớp chủ động được truyền động bởi các cơ cấu truyền động, trong khi đó các khớp bị động là các khớp tự do không có cơ cấu truyền động. Tay máy robot song song chuyển động nhờ lực/mô-men truyền động ở các khớp chủ động, vì vậy chúng ta cần thiết phải xây dựng mô hình động lực học của tay máy robot trong hệ tọa độ các khớp chủ động.

Đầu tiên, một số khớp thụ động được thực hiện “cắt ảo” để hệ thống động học khép kín trở thành hệ thống hở tương đương. Lưu ý rằng có thể có nhiều hơn một cách thực hiện công việc này, như được thể hiện ở Hình 2.2a và Hình 2.2b. Lúc này, gọi  $N_o$  là tổng số khớp của hệ thống hở tương đương,  $\theta_o \in \mathbb{R}^{N_o}$  là vector biến khớp, và  $\tau_o \in \mathbb{R}^{N_o}$  là vector mô-men đầu vào.



**Hình 2.2.** Hai cách khác nhau (a và b) để thực hiện cắt ảo tạo nên hệ thống hở tương đương từ hệ thống kín ban đầu

Tiếp theo, giả thiết rằng không có lực hoặc mô-men tác động tại các khớp đã được “cắt ảo”. Bằng cách sử dụng các phương pháp phân tích lực Newton-Euler

hoặc sử dụng phương trình Lagrange, chúng ta xây dựng được mô hình động lực học cho hệ thống hở với dạng tổng quát như sau:

$$\mathbf{M}_O \ddot{\boldsymbol{\theta}}_O + \mathbf{C}_O \dot{\boldsymbol{\theta}}_O + \mathbf{G}_O + \mathbf{F}_O = \boldsymbol{\tau}_O \quad (2.1)$$

trong đó  $\mathbf{M}_O \in \mathbf{R}^{No \times No}$  là ma trận quán tính;  $\mathbf{C}_O \in \mathbf{R}^{No \times No}$  là ma trận Coriolis và các lực hướng tâm;  $\mathbf{G}_O \in \mathbf{R}^{No}$  là vector lực trọng trường; và  $\mathbf{F}_O \in \mathbf{R}^{No}$  là vector của lực ma sát.

Cho một chuyển động của hệ thống hở tương đương trong khi các mối quan hệ ràng buộc về động học như hệ thống kín ban đầu của tay máy robot song song vẫn được đảm bảo, thì các mô-men truyền động tại các khớp cần tạo ra là  $\boldsymbol{\tau}_O \in \mathbf{R}^{No}$ . Khi đó, đối với tay máy robot song song ban đầu thì mô-men cần truyền động cho các khớp chủ động là  $\boldsymbol{\tau}_a \in \mathbf{R}^{Na}$ . Dựa theo nguyên lý D'Alembert và nguyên lý dịch chuyển khả dĩ chúng ta có mối quan hệ giữa  $\boldsymbol{\tau}_O$  và  $\boldsymbol{\tau}_a$  như sau [22, 23]:

$$\boldsymbol{\tau}_a = \boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\tau}_O \quad (2.2)$$

trong đó  $\boldsymbol{\Psi} = \partial \boldsymbol{\theta}_O / \partial \boldsymbol{\theta}_a \in \mathbf{R}^{No \times Na}$  là ma trận Jacobian thể hiện mối quan hệ giữa tất cả các khớp trong hệ thống hở tương đương với các khớp chủ động trong hệ thống kín ban đầu. Phương pháp để tìm ma trận Jacobian được trình bày trong tài liệu [25].

Bên cạnh đó, chúng ta có những mối quan hệ sau:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_O = \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_O}{\partial \boldsymbol{\theta}_a} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a = \boldsymbol{\Psi} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a \quad (2.3)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_O = \dot{\boldsymbol{\Psi}} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \boldsymbol{\Psi} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a \quad (2.4)$$

Bằng cách nhân cả 2 vế của phương trình (2.1) với  $\boldsymbol{\Psi}^T$ , và sau đó thay các phương trình (2.2), (2.3) và (2.4) vào phương trình mới chúng ta có:

$$\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M}_O \boldsymbol{\Psi} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + (\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M}_O \dot{\boldsymbol{\Psi}} + \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{C}_O \boldsymbol{\Psi}) \dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{G}_O + \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{F}_O = \boldsymbol{\tau}_a \quad (2.5)$$

Chúng ta định nghĩa:

+  $\hat{\mathbf{M}}_a = \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{M}_O \boldsymbol{\Psi} \in \mathbf{R}^{Na \times Na}$  là ước lượng tính toán của ma trận quán tính,

+  $\hat{C}_a = \Psi^T M_O \dot{\Psi} + \Psi^T C_O \Psi \in \mathbf{R}^{Na \times Na}$  là ước lượng tính toán của lực Coriolis và ma trận hướng tâm,

+  $\hat{G}_a = \Psi^T G_O \in \mathbf{R}^{Na}$  là ước lượng tính toán của trọng lực, và

+  $F_a = \Psi^T F_O \in \mathbf{R}^{Na}$  là vector tổng các lực ma sát tác động vào các khớp của tay máy robot song song.

Khi đó, mô hình động lực học dạng tổng quát của tay máy robot song song được biểu diễn bởi phương trình sau:

$$\hat{M}_a \ddot{\theta}_a + \hat{C}_a \dot{\theta}_a + \hat{G}_a + F_a = \tau_a \quad (2.6)$$

Lưu ý rằng ảnh hưởng của các lực ma sát và các nhiễu loạn từ bên ngoài lên các khớp thụ động thường nhỏ, chủ yếu là các lực này ảnh hưởng lên các khớp chủ động. Vì vậy, để đơn giản hóa mô hình động lực học, chỉ các thành phần lực này tác dụng lên các khớp chủ động được tính đến.

Mô hình (2.6) của một tay máy robot song song dạng tổng quát có những tính chất sau đây đã được chứng minh ở trong tài liệu [18]:

**Tính chất 1:**  $\hat{M}_a$  là một ma trận xác định dương và đối xứng.

**Tính chất 2:**  $\dot{\hat{M}}_a - 2\hat{C}_a$  là một ma trận xoắn-đối xứng (skew-symmetric matrix).

Trong thực tế, do tính chất phức tạp, phi tuyến và xen kênh, mô hình động lực học tuyệt đối chính xác của tay máy robot song song không thể xây dựng được. Vì vậy các ma trận thành phần có sự tồn tại của các thành phần bất định được biểu diễn như sau:

$$M_a = \hat{M}_a + \Delta M_a \quad (2.7)$$

$$C_a = \hat{C}_a + \Delta C_a \quad (2.8)$$

$$G_a = \hat{G}_a + \Delta G_a \quad (2.9)$$

trong đó  $\Delta M_a$ ,  $\Delta C_a$  và  $\Delta G_a$  là các thành phần sai số mô hình, có tính chất hữu hạn và bị chặn trên.



Như vậy, chúng ta có thể biểu diễn mô hình động lực học của một tay máy robot song song ở dạng tổng quát có xét đến sai số mô hình và các thành phần bất định như sau:

$$\hat{\mathbf{M}}_a \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \hat{\mathbf{C}}_a \dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \hat{\mathbf{G}}_a + \Delta \boldsymbol{\tau}_a = \boldsymbol{\tau}_a \quad (2.10)$$

trong đó  $\Delta \boldsymbol{\tau}_a = \Delta \mathbf{M}_a \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \Delta \mathbf{C}_a \dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \Delta \mathbf{G}_a + \mathbf{F}_a + \mathbf{d}_a(t)$  là vector chứa các thành phần bất định, sai số mô hình và các nhiễu loạn từ bên ngoài;  $\mathbf{d}_a(t)$  là vector của các lực nhiễu loạn từ bên ngoài tác động lên các khớp chủ động.

Đối với trường hợp tay máy robot song song phẳng chỉ hoạt động trên mặt phẳng ngang, thành phần trọng lực bị triệt tiêu. Do đó mô hình động lực học dạng tổng quát của tay máy robot song song phẳng được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$\hat{\mathbf{M}}_a \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \hat{\mathbf{C}}_a \dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \Delta \boldsymbol{\tau}_a = \boldsymbol{\tau}_a \quad (2.11)$$

trong đó:  $\Delta \boldsymbol{\tau}_a = \Delta \mathbf{M}_a \ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \Delta \mathbf{C}_a \dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \mathbf{F}_a + \mathbf{d}_a(t)$  là vector chứa các thành phần bất định, sai số mô hình và các nhiễu loạn từ bên ngoài.

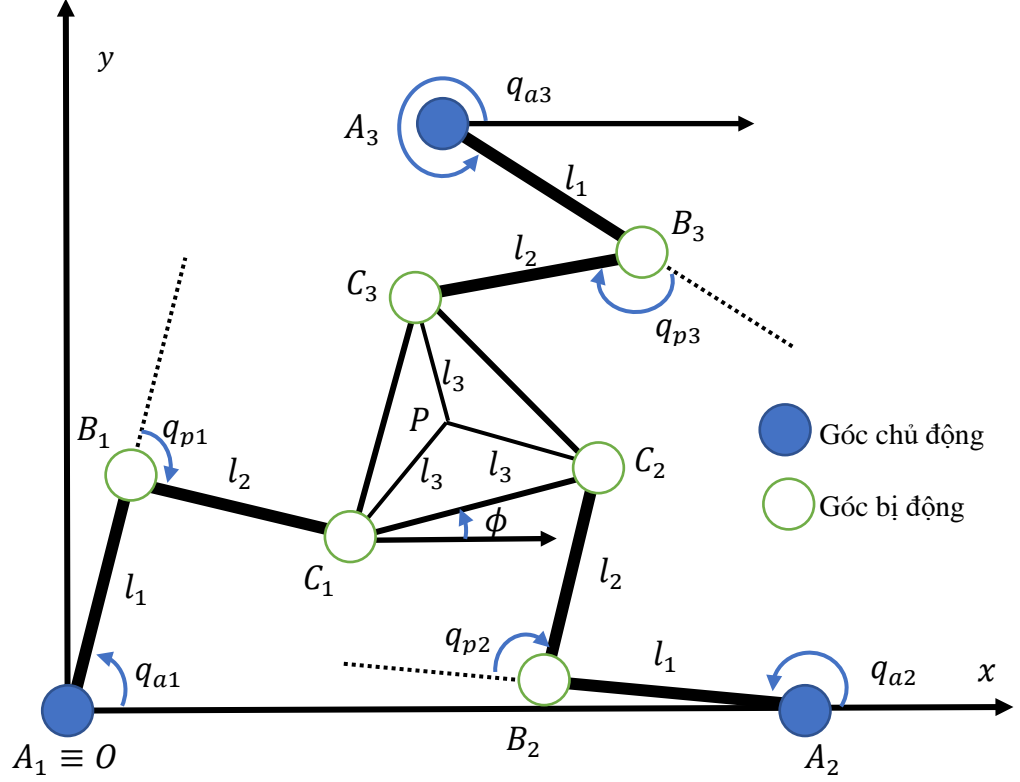
## 2.3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CHO TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG 3 BẬC TỰ DO

### 2.3.1. Mô hình động học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do

Để kiểm nghiệm phương pháp chung để xây dựng mô hình động lực học cho tay máy robot song song phẳng, trong đề tài chọn tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do làm đối tượng nghiên cứu áp dụng. Để xây dựng mô hình động lực học, đầu tiên cần phải xây dựng mô hình động học của tay máy để tính toán các mối quan hệ động học, các ma trận Jacobian và tính toán các cấu hình kỳ dị.

Mô tả hình học tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR như Hình 2.3. Khâu chấp hành cuối duy chuyển được liên kết bởi ba tay máy động học độc lập nối với mỗi khớp tích cực. Góc  $\mathbf{q}_a$  và  $\mathbf{q}_p$  là góc chủ động và góc bị động của các khớp, theo thứ tự của ba tay máy  $i = 1, 2, 3$ . Chiều dài tay máy  $l_i$  và khâu chấp hành cuối  $C_1 C_2 C_3$  xoay góc  $\phi_p$ . Hệ thống tọa độ (x, y) đưa ra để

xác định vị trí khâu chấp hành cuối. Điểm O trùng  $A_1$  là điểm gốc, điểm  $P(x_P, y_P)$  và  $\phi_P$  là vị trí và góc xoay của khâu chấp hành cuối di chuyển dựa theo tọa độ  $(x, y)$ .



**Hình 2.3.** Tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR

Xét mô hình tay máy robot song song phẳng 3-RRR như trên Hình 2.3 hoạt động trên mặt phẳng nằm ngang trong hệ tọa độ Descartes. Có các véc tơ như sau:

$\mathbf{q}_a = [q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}]^T$  là véc tơ góc chủ động.

$\mathbf{q}_p = [q_{p1}, q_{p2}, q_{p3}]^T$  là véc tơ góc bị động.

$\mathbf{X} = [x_P, y_P, \phi_P]^T$  là véc tơ tọa độ và góc xoay của khâu chấp hành cuối.

Trong mô hình tay máy robot này, lực tác động được đưa vào các khớp chủ động  $(q_{a1}, q_{a2}, q_{a3})$  để điều khiển tọa độ và quỹ đạo chuyển động của khâu chấp hành cuối trong hệ tọa độ  $(x, y)$ . Điều đó dẫn đến việc tìm mô hình động học thuận và động học ngược được xây dựng theo quan hệ giữa hệ tọa độ khớp chủ động  $(q_{a1}, q_{a2}, q_{a3})$  và hệ tọa độ  $(x, y)$  và góc xoay  $\phi_P$ , hay nói cách khác, đó là quan hệ giữa véc tơ  $\mathbf{q}_a$  và véc tơ  $\mathbf{X}$ .

### a) Động học thuận

Để tìm động học thuận của tay máy robot song song phẳng 3-RRR, theo mô tả hình học như Hình 1.2 có được:

$$\left[ x_P - x_{Ai} - l_1 \cos \mathbf{q}_{ai} - l_3 \cos(\phi_P + \psi_i) \right]^2 + \left[ y_P - y_{Ai} - l_1 \sin \mathbf{q}_{ai} - l_3 \sin(\phi_P + \psi_i) \right]^2 = l_2^2 \quad (2.12)$$

Với:  $\psi_i = [7\pi/6 ; 11\pi/6 ; \pi/2]$ ;  $i = 1, 2, 3$ .

Phương trình trên thể hiện mối quan hệ giữa véc tơ góc chủ động  $\mathbf{q}_a$  và véc tơ  $\mathbf{X}$ . Giải phương trình (2.12), thu được mô hình động học thuận, đó chính là mô hình quan hệ giữa véc tơ  $\mathbf{X}$  véc tơ  $\mathbf{q}_a$ .

Trong quá trình tính toán để điều khiển bám quỹ đạo đặt, cần thêm giá trị tham số tính toán đó là véc tơ góc bị động  $\mathbf{q}_p$ . Để tìm góc bị động  $\mathbf{q}_p$ , tương tự như trên, dựa vào mô tả hình học thu được:

$$\mathbf{q}_p = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{l_1^2 + l_2^2 - x_{Ci}^2 - y_{Ci}^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (2.13)$$

Với tọa độ điểm  $C_i$  được tính từ ( $i = 1, 2, 3$ ):

$$x_{Ci} = x_P - l_3 \cos(\phi_P + \psi_i) - x_{Ai} \quad (2.14)$$

$$y_{Ci} = x_P - l_3 \sin(\phi_P + \psi_i) - y_{Ai} \quad (2.15)$$

### b) Động học ngược

Tương tự mô hình động học thuận, mô hình động học ngược được tính dựa vào mô tả hình học, góc chủ động  $\mathbf{q}_a$  được tính là góc được tạo ra từ đoạn thẳng nối vị trí điểm  $A_i$  đến  $C_i$  và trục x cộng với góc được tạo ra từ đoạn thẳng nối vị trí điểm  $A_i$  đến  $C_i$  và đoạn thẳng nối vị trí điểm  $A_i$  đến  $B_i$ . Như vậy ta có được:

$$\mathbf{q}_a = \tan^{-1} \left( \frac{y_{Ci}}{x_{Ci}} \right) + \cos^{-1} \left( \frac{l_1^2 - l_2^2 + x_{Ci}^2 + y_{Ci}^2}{2l_1 \sqrt{x_{Ci}^2 + y_{Ci}^2}} \right) \quad (2.16)$$

Với  $i = 1, 2, 3$ .

### c) Các ma trận Jacobian

Như vậy các phần trên đã mô tả đầy đủ về động học thuận và động học ngược của tay máy robot song song phẳng 3-RRR. Để tìm quan hệ chuyển đổi vận tốc, gia tốc trong không gian góc chủ động sang vận tốc, gia tốc trong không gian làm việc và ngược lại ta sẽ tìm các ma trận Jacobian.

Từ mô tả hình học tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR, ta có:

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{oi} + l_1 \cos q_{ai} + l_2 \cos(q_{ai} + q_{pi}) + l_3 \cos(\psi_i + \phi_P) \\ y_{oi} + l_1 \sin q_{ai} + l_2 \sin(q_{ai} + q_{pi}) + l_3 \sin(\psi_i + \phi_P) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Đạo hàm phương trình (2.17) theo thời gian ta được:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{y}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{q}_{ai} \sin q_{ai} - l_2 (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \sin(q_{ai} + q_{pi}) - l_3 \dot{\phi}_P \sin(\psi_i + \phi_P) \\ l_1 \dot{q}_{ai} \cos q_{ai} + l_2 (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \cos(q_{ai} + q_{pi}) + l_3 \dot{\phi}_P \cos(\psi_i + \phi_P) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Với  $i = 1, 2, 3$ .

Từ (2.18) ta rút gọn để loại bỏ  $\dot{q}_p$  thì thu được phương trình thể hiện quan hệ giữa  $\dot{q}_a$  theo ma trận  $\dot{X}$ :

$$J_{z1} \dot{X} = J_o \dot{q}_a \quad (2.19)$$

$$\text{Với : } \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_P \\ \dot{y}_P \\ \dot{\phi}_P \end{bmatrix}, \dot{q}_a = \begin{bmatrix} \dot{q}_{a1} \\ \dot{q}_{a2} \\ \dot{q}_{a3} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3.$$

Trong đó các ma trận Jacobian như sau:

$$J_{z1} = \begin{bmatrix} az1_1 & bz1_1 & cz1_1 \\ az1_2 & bz1_2 & cz1_2 \\ az1_3 & bz1_3 & cz1_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$J_o = \begin{bmatrix} dz1_1 & 0 & 0 \\ 0 & dz1_2 & 0 \\ 0 & 0 & dz1_3 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\text{Với: } \begin{cases} az1_i = \cos(\mathbf{q}_{ai} + \mathbf{q}_{pi}) \\ bz1_i = \sin(\mathbf{q}_{ai} + \mathbf{q}_{pi}) \\ cz1_i = -l_3 \sin(\mathbf{q}_{ai} + \mathbf{q}_{pi} - \psi_i - \phi_P) \\ dz1_i = l_1 \sin \mathbf{q}_{pi} \end{cases}, i = 1, 2, 3.$$

Từ phương trình (2.19) có thể viết lại :

$$\dot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{J}_{oz} \dot{\mathbf{X}} \quad (2.22)$$

Với:

$$\mathbf{J}_{oz} = \mathbf{J}_o^{-1} \mathbf{J}_{z1} \quad (2.23)$$

Từ đó có thể suy ra thêm các ma trận khác khi đạo hàm tiếp theo thời gian, được các ma trận như sau:

$$\mathbf{J}_{z1} = \begin{bmatrix} \dot{az}1_1 & \dot{bz}1_1 & \dot{cz}1_1 \\ \dot{az}1_2 & \dot{bz}1_2 & \dot{cz}1_2 \\ \dot{az}1_3 & \dot{bz}1_3 & \dot{cz}1_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{J}_o = \begin{bmatrix} \dot{dz}1_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{dz}1_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{dz}1_3 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{J}_{oz} = \frac{\mathbf{J}_{z1} \mathbf{J}_o - \mathbf{J}_{z1} \mathbf{J}_o}{J_o^2} \quad (2.26)$$

$$\text{Với: } \begin{cases} \dot{az}1_i = -(\dot{\mathbf{q}}_{ai} + \dot{\mathbf{q}}_{pi}) \sin(\mathbf{q}_{ai} + \mathbf{q}_{pi}) \\ \dot{bz}1_i = (\dot{\mathbf{q}}_{ai} + \dot{\mathbf{q}}_{pi}) \cos(\mathbf{q}_{ai} + \mathbf{q}_{pi}) \\ \dot{cz}1_i = -l_3 (\dot{\mathbf{q}}_{ai} + \dot{\mathbf{q}}_{pi} - \dot{\phi}_P) \cos(\mathbf{q}_{ai} + \mathbf{q}_{pi} - \psi_i - \phi_P) \\ \dot{dz}1_i = l_1 \dot{\mathbf{q}}_{pi} \cos \mathbf{q}_{pi} \end{cases}, i = 1, 2, 3.$$

Tương tự, từ (2.18) ta rút gọn để loại bỏ  $\dot{\mathbf{q}}_a$  thì thu được phương trình thể hiện quan hệ giữa  $\dot{\mathbf{q}}_p$  theo ma trận  $\dot{\mathbf{X}}$ :

$$\mathbf{J}_{z2} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J}_p \dot{\mathbf{q}}_p \quad (2.27)$$

$$\text{Với: } \dot{\mathbf{q}}_p = \begin{bmatrix} \dot{q}_{p1} \\ \dot{q}_{p2} \\ \dot{q}_{p3} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3.$$

Và các ma trận Jacobian như sau:

$$J_{z2} = \begin{bmatrix} az2_1 & bz2_1 & cz2_1 \\ az2_2 & bz2_2 & cz2_2 \\ az2_3 & bz2_3 & cz2_3 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$J_p = \begin{bmatrix} dz2_1 & 0 & 0 \\ 0 & dz2_2 & 0 \\ 0 & 0 & dz2_3 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} az2_i = l_1 \cos q_{ai} + l_2 \cos(q_{ai} + q_{pi}) \\ bz2_i = l_1 \sin q_{ai} + l_2 \sin(q_{ai} + q_{pi}) \\ cz2_i = l_2 l_3 \sin(\psi_i + \phi_P - q_{ai} - q_{pi}) + l_1 l_3 \sin(\psi_i + \phi_P - q_{ai}) \\ dz2_i = -l_1 l_2 \sin q_{pi} \end{cases}$$

Với:  $i = 1, 2, 3$ .

Từ phương trình (2.27) có thể viết lại :

$$\dot{q}_p = J_{pz} \dot{X} \quad (2.30)$$

Với:

$$J_{pz} = J_p^{-1} J_{z2} \quad (2.31)$$

Từ đó có thể suy ra thêm các ma trận khác khi đạo hàm tiếp theo thời gian, được các ma trận như sau:

$$\dot{J}_{z2} = \begin{bmatrix} a\dot{z}2_1 & b\dot{z}2_1 & c\dot{z}2_1 \\ a\dot{z}2_2 & b\dot{z}2_2 & c\dot{z}2_2 \\ a\dot{z}2_3 & b\dot{z}2_3 & c\dot{z}2_3 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\dot{J}_p = \begin{bmatrix} d\dot{z}2_1 & 0 & 0 \\ 0 & d\dot{z}2_2 & 0 \\ 0 & 0 & d\dot{z}2_3 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\dot{J}_{pz} = \frac{J_{z2} \dot{J}_p - J_{z2} \dot{J}_p}{J_p^2} \quad (2.34)$$

$$\text{Với: } \begin{cases} a\dot{z}2_i = -l_1 \dot{q}_{ai} \sin(q_{ai}) - l_2 (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \sin(q_{ai} + q_{pi}) \\ b\dot{z}2_i = l_1 \dot{q}_{ai} \cos(q_{ai}) + l_2 (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \cos(q_{ai} + q_{pi}) \\ c\dot{z}2_i = l_1 l_3 (\dot{\phi}_P - \dot{q}_{ai}) \cos(\psi_i + \phi_P - q_{ai}) \\ \quad + l_2 l_3 (\dot{\phi}_P - \dot{q}_{ai} - \dot{q}_{pi}) \cos(\psi_i + \phi_P - q_{ai} - q_{pi}) \\ d\dot{z}2_i = -l_1 l_2 \dot{q}_{pi} \cos(q_{pi}) \end{cases}, i =$$

1, 2, 3.

Như vậy phương trình (2.22) chính là phương trình thể hiện vận tốc thay đổi góc chủ động  $\dot{\mathbf{q}}_a$  của tay máy robot song song phẳng 3-RRR so với vị trí tọa độ và góc xoay của khâu chấp hành cuối. Bây giờ để tính ma trận gia tốc góc chủ động ta đạo hàm tiếp phương trình (2.22) theo thời gian thu được phương trình như sau:

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{J}_{oz}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{J}_{oz}\ddot{\mathbf{X}} \quad (2.35)$$

$$\text{Với : } \ddot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_P \\ \ddot{y}_P \\ \ddot{\phi}_P \end{bmatrix}, \ddot{\mathbf{q}}_a = \begin{bmatrix} \ddot{q}_{a1} \\ \ddot{q}_{a2} \\ \ddot{q}_{a3} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3.$$

Tương tự, đạo hàm phương trình (2.30) theo thời gian thu được phương trình sau:

$$\ddot{\mathbf{q}}_p = \mathbf{J}_{pz}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{J}_{pz}\ddot{\mathbf{X}} \quad (2.36)$$

$$\text{Với : } \ddot{\mathbf{q}}_p = \begin{bmatrix} \ddot{q}_{p1} \\ \ddot{q}_{p2} \\ \ddot{q}_{p3} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3.$$

Như vậy ta đã xác định được các ma trận Jacobian thể hiện được mối quan hệ về giá trị, vận tốc, và gia tốc của các góc khớp chủ động và bị động với vị trí và góc xoay của khâu chấp hành cuối. Các ma trận Jacobian này cần thiết cho việc tính toán không gian làm việc loại trừ điểm kỳ dị và mô hình động lực học ở các phần tiếp theo.

#### ***d) Các cấu hình kỳ dị***

Theo Merlet J.P. trong [26] đã trình bày các cách tìm ra cấu hình kỳ dị tổng quát cho các loại tay máy robot song song. Trong khi các cách tìm cấu hình kỳ dị khác đều dựa vào ma trận Jacobian và kết cấu hình học [27]. Cấu hình kỳ dị xảy ra khi các góc chủ động và vị trí, góc xoay của khâu chấp hành cuối theo một mối quan hệ vô nghiệm, hay nói cách khác, nếu xét về phương diện toán học sẽ không tồn tại giá trị biến trong phương trình giữa góc chủ động và tọa độ, góc xoay của khâu chấp hành cuối. Xét về phương diện vật lý của mô hình thực tế, cấu hình kỳ dị xảy ra khi các thanh của tay máy robot bị căng ra hoặc gấp lại. Nếu tay máy

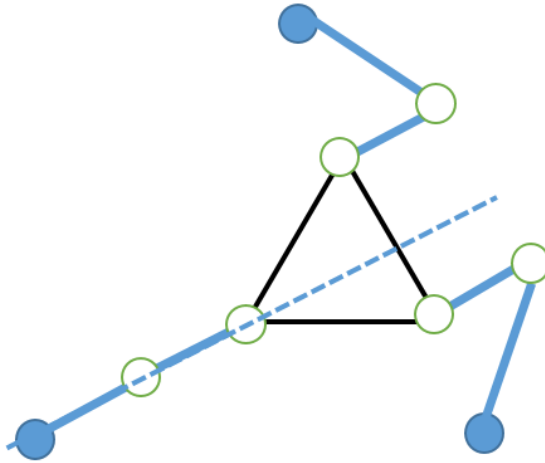
robot bị rơi vào trường hợp đó thì chắc chắn một điều là việc điều khiển sẽ khó khăn và không bám tốt quỹ đạo đặt ra, hay thậm chí là không thể điều khiển được. Chính vì vậy, việc tìm ra một không gian làm việc loại trừ các cấu hình kỳ dị được coi là việc tất yếu trong thiết kế điều khiển tay máy robot nói chung và tay máy robot song song phẳng nói riêng.

Đối với tay máy robot được nghiên cứu trong luận văn này, khi xảy ra cấu hình kỳ dị thì phương trình (2.23) trở nên vô nghiệm. Tức là  $J_o$  vô nghiệm hoặc  $J_{z1}$  vô nghiệm hoặc cả  $J_o$  và  $J_{z1}$  vô nghiệm. Như vậy dẫn đến có tất cả là ba khả năng xảy ra cấu hình kỳ dị [27, 28].

- **Cấu hình kỳ dị loại 1**

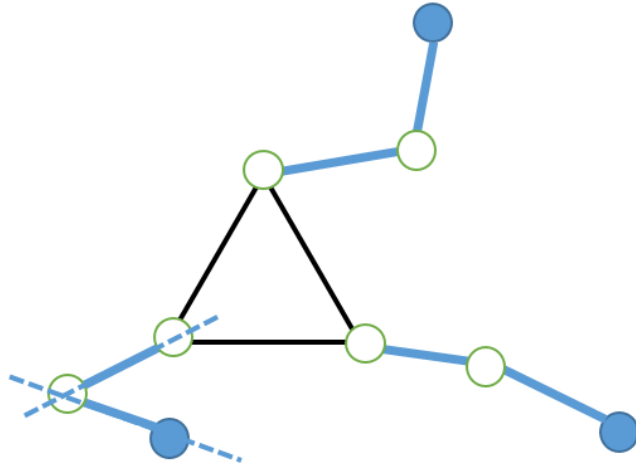
Cấu hình kỳ dị loại 1 xảy ra khi  $\det(J_o) = 0$  và  $\det(J_{z1}) \neq 0$ . Điều này xảy ra khi thanh  $l_1$  và  $l_2$  xếp thẳng hàng hoặc bị gấp lại như Hình 2.4 và Hình 2.5.

Trong trường hợp này, lực tác động vào khớp chủ động có thể làm lệch tay máy robot, dẫn tới các thanh hoặc bị căng ra hoặc bị gấp lại.



**Hình 2.4.** Cấu hình kỳ dị loại 1 khi ít nhất 1 thanh bị duỗi thẳng ra

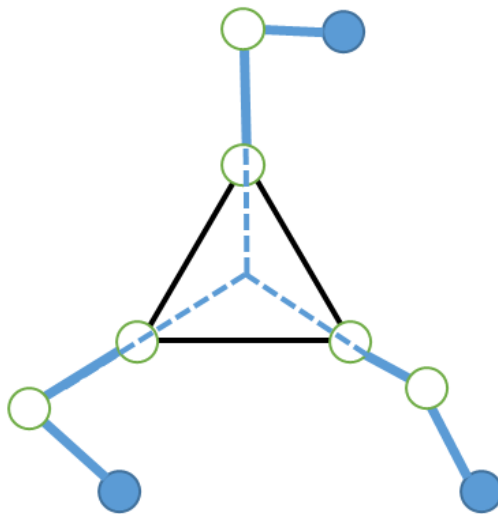




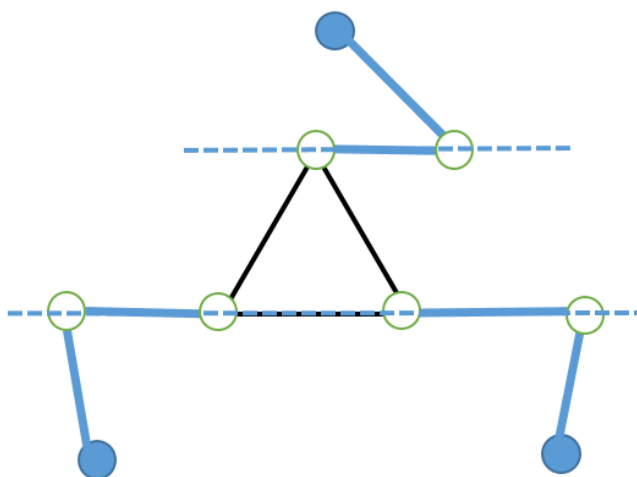
**Hình 2.5.** Cấu hình kỳ dị loại 1 khi ít nhất 1 thanh bị gấp lại

- **Cấu hình kỳ dị loại 2**

Cấu hình kỳ dị loại 2 xảy ra khi  $\det(\mathbf{J}_o) \neq 0$  và  $\det(\mathbf{J}_{z1}) = 0$ . Điều này xảy ra khi tất cả các chuỗi nối tiếp cắt nhau tại một điểm hoặc các tay máy song song nhau như Hình 2.6 và Hình 2.7.



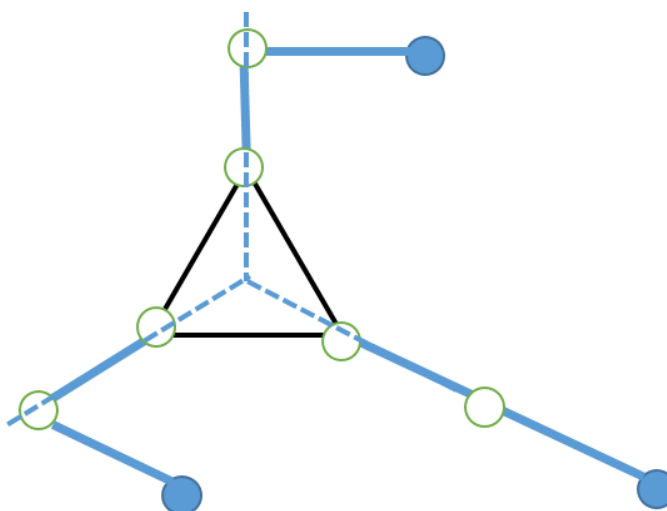
**Hình 2.6.** Cấu hình kỳ dị loại 2 khi các tất cả các chuỗi nối tiếp cắt nhau tại một điểm



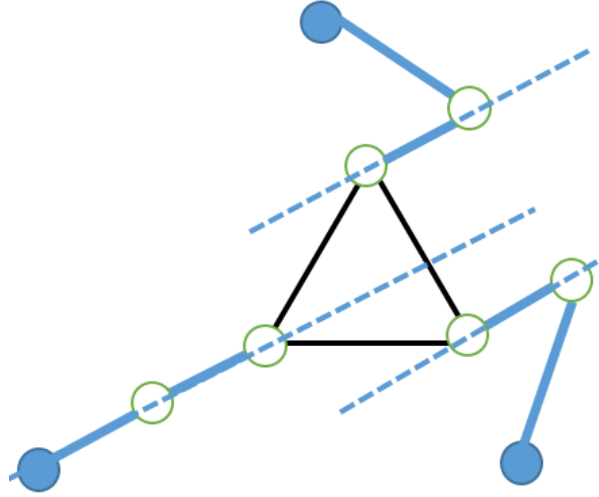
**Hình 2.7.** Cấu hình kỳ dị loại 2 khi các thanh song song nhau

- **Cấu hình kỳ dị loại 3**

Cấu hình kỳ dị loại 3 xảy ra khi đồng thời cả  $\det(\mathbf{J}_o) = 0$  và  $\det(\mathbf{J}_{z1}) = 0$ . Điều này xảy ra khi các thanh vừa bị căng vừa cắt nhau tại một điểm hoặc vừa bị căng vừa song song nhau như Hình 2.8 và Hình 2.9.



**Hình 2.8.** Cấu hình kỳ dị loại 3 khi các thanh vừa bị căng vừa cắt nhau tại một điểm



**Hình 2.9.** Cấu hình kỳ dị loại 3 khi các thanh vừa bị duỗi thẳng vừa song song nhau

Rõ ràng thấy được là khi xảy ra bất cứ cấu hình kỳ dị nào thì phương trình (2.23) sẽ không thỏa mãn, hay nói cách khác nó không có nghiệm. Từ đó dẫn đến tay máy robot song song sẽ mất đi độ cứng vững của nó, vốn là ưu điểm khi so sánh với tay máy nối tiếp. Để loại trừ cấu hình kỳ dị, có thể dựa vào kích thước hình học để tìm ra một kích thước hợp lý, tuy nhiên cũng không thể loại trừ hết tất cả các cấu hình kỳ dị. Một cách khác là đi tìm ra vùng không gian làm việc không có cấu hình kỳ dị, tức là vùng làm việc loại trừ điểm kỳ dị, sau đó thiết kế quỹ đạo làm việc trong vùng không gian làm việc đó để đảm bảo không có cấu hình kỳ dị xảy ra.

### **2.3.2. Mô hình động học lực học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do**

Để tính toán động lực học, ta sử dụng phương pháp “cắt ảo” để được mô hình hệ thống hở tương đương như Hình 2.10. Từ mô hình tương đương này, sử dụng phương trình Lagrange cho các khâu động học hở và tính lực tác động cần thiết để tác động vào các khớp chủ động của robot. Các phương trình Lagrange khi bỏ đi lực ma sát và tổn thất ngoại lực, như phương trình sau:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_i}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial L_i}{\partial q_i} \right) = \tau_q \quad (2.37)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_i}{\partial \dot{X}} \right) - \left( \frac{\partial L_i}{\partial X} \right) = \tau_X \quad (2.38)$$

Trong đó:

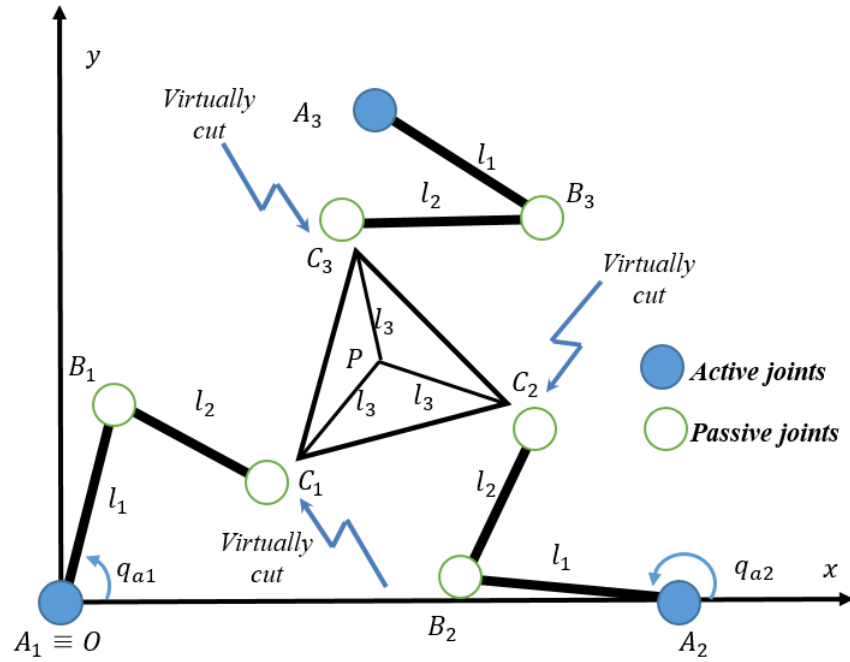
$L_i$  là hàm Lagrange cho mỗi khớp của robot,  $i = 1,2,3$ ,

$\mathbf{q} = [q_{ai}, q_{pi}]^T$  là véc tơ góc quay các khớp,

$\boldsymbol{\tau}_q = [\tau_{ai}, \tau_{pi}]^T$  là véc tơ lực tác động,

$\mathbf{X} = [x_P, y_P, \phi_P]^T$  là vị trí khâu chấp hành cuối theo trục tọa độ Descartes,

$\boldsymbol{\tau}_X = [\tau_{xP}, \tau_{yP}, \tau_{\phi P}]^T$  là véc tơ lực tác động vào khâu chấp hành cuối.



**Hình 2.10.** Mô hình hệ thống hở tương đương 3-RRR

Từ (2.37) và (2.38) ta có thể viết lại:

$$\begin{aligned} \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_a} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_a} - \boldsymbol{\tau}_a \right) \delta \mathbf{q}_a + \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_p} - \boldsymbol{\tau}_p \right) \delta \mathbf{q}_p \\ + \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{X}}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{X}_p} - \boldsymbol{\tau}_X \right) \delta \mathbf{X}_p = 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Viết lại phương trình (2.39) theo các bước biến đổi như sau:

$$\left[ \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_a} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_a} - \boldsymbol{\tau}_a \right), \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_p} - \boldsymbol{\tau}_p \right), \right.$$

$$\left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{X}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial X_p} - \tau_X \right) \begin{bmatrix} \delta q_a \\ \delta q_p \\ \delta X_p \end{bmatrix} = 0 \quad (2.40)$$

Viết lại (2.40):

$$\begin{aligned} & \left[ \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_a} \right), \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_p} \right) \frac{\partial q_p}{\partial q_a}, \right. \\ & \left. \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{X}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial X_p} \right) \frac{\partial X_p}{\partial q_a} \right] \delta q_a = \tau_a \delta q_a + \tau_p \delta q_p + \tau_X \delta X_p \end{aligned} \quad (2.41)$$

Viết lại (2.41):

$$\begin{aligned} & \left[ \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_a} \right), \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_p} \right), \right. \\ & \left. \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{X}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial X_p} \right) \right] \begin{bmatrix} I \\ \frac{\partial q_p}{\partial q_a} \\ \frac{\partial X_p}{\partial q_a} \end{bmatrix} = \tau_a^T + \tau_p^T \frac{\partial q_p}{\partial q_a} + \tau_X^T \frac{\partial X_p}{\partial q_a} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Với tay máy robot 3-RRR thì lực tác động cần thiết chỉ tác động vào các khớp chủ động, như vậy lực tác động theo (2.6) chỉ còn lại  $\tau_a$ . Phương trình (2.42) có thể được viết lại như sau:

$$\left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_a} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_a}, \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_p}, \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{X}_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial X_p} \right] \begin{bmatrix} I \\ \frac{\partial q_p}{\partial q_a} \\ \frac{\partial X_p}{\partial q_a} \end{bmatrix} = \tau_a \quad (2.43)$$

Từ phương trình (2.42) và (2.43), ta có thể kết hợp lại theo dạng sau:

$$W^T \tau = \tau_a \quad (2.44)$$

Với:  $\tau = [\tau_a, \tau_p, \tau_X]^T$  là ma trận lực tác động lên tay máy robot 3-RRR có kích thước  $9 \times 1$ .  $W = [I, \partial q_p / \partial q_a, \partial X_p / \partial q_a]^T$  là ma trận góc và vận tốc góc chủ động được viết như sau:

$$W = \begin{bmatrix} I \\ \frac{\partial q_p}{\partial q_a} \\ \frac{\partial X_p}{\partial q_a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ J_{oz}^{-1} J_{pz} \\ J_{oz}^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Với:  $I$  là ma trận đơn vị có kích thước 3x3 và các ma trận:

$$J_1 = J_{oz}^{-1} J_{pz} \quad (2.46)$$

$$J_2 = J_{oz}^{-1} \quad (2.47)$$

Mô hình động lực học hệ thống hở tương đương của tay máy robot song song phẳng 3-RRR có thể được viết theo dạng tổng quát:

$$M_t(q)\ddot{q} + C_t(q, \dot{q})\dot{q} = \tau \quad (2.48)$$

Trong đó:

$q = [q_a, q_p, X_p]^T$  là véc tơ góc tại các khớp và vị trí khâu chấp hành cuối,

$M_t(q)$  là ma trận quán tính có kích thước 9x9,

$C_t(q, \dot{q})$  là ma trận Coriolis và lực hướng tâm có kích thước 9x9.

Các ma trận này được viết từ phương trình Lagrange. Phương trình Lagrange tổng quát:

$$L = K - P \quad (2.49)$$

Với:  $L$  là hàm Lagrange,  $K$  là động năng,  $P$  là thế năng.

Do tay máy robot song song phẳng 3-RRR đặt song song nằm ngang nên coi như thế năng bằng không, tức  $P = 0$ , như vậy ta chỉ xét trong phương trình Lagrange chỉ còn động năng. Như vậy hàm Lagrange  $L$  cho các thanh được viết như sau:

$$L_i = \frac{1}{2} \left[ m_{i1}(\dot{x}_{i1}^2 + \dot{y}_{i1}^2) + m_{i2}(\dot{x}_{i2}^2 + \dot{y}_{i2}^2) + I_{i1}\dot{q}_{ai}^2 + I_{i2}(\dot{q}_{a1} + \dot{q}_{p1})^2 \right] \quad (2.50)$$

Với  $i = 1, 2, 3$ :

$m_{i1}$  và  $m_{i2}$  là khối lượng của tay máy robot  $l_1$  và  $l_2$  thứ  $i$ ;

$I_{i1}$  và  $I_{i2}$  là mô men quán tính của thanh  $l_1$  và  $l_2$  của tay máy robot thứ  $i$ .

Tiếp theo đi tìm các tham số cần thiết để tính toán. Từ mô tả hình học của tay máy robot 3-RRR ta có các phương trình tọa độ điểm  $B_i, C_i$  như sau:

$$\begin{cases} x_{i1} = x_{Ai} + l_1 \cos q_{ai} \\ y_{i1} = y_{Ai} + l_1 \sin q_{ai} \end{cases} \quad (2.51)$$

Đạo hàm (2.51) theo thời gian, ta có:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = -l_1 \dot{q}_{ai} \sin q_{ai} \\ \dot{y}_{i1} = l_1 \dot{q}_{ai} \cos q_{ai} \end{cases} \quad (2.52)$$

Tương tự ta có:

$$\begin{cases} x_{i2} = x_{Ai} + l_1 \cos q_{ai} + l_{c2} \cos(q_{ai} + q_{pi}) \\ y_{i2} = y_{Ai} + l_1 \sin q_{ai} + l_{c2} \sin(q_{ai} + q_{pi}) \end{cases} \quad (2.53)$$

Đạo hàm (2.53) theo thời gian, ta có:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i2} = -l_1 \dot{q}_{ai} \sin q_{ai} - l_{c2} (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \sin(q_{ai} + q_{pi}) \\ \dot{y}_{i2} = l_1 \dot{q}_{ai} \cos q_{ai} + l_{c2} (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi}) \cos(q_{ai} + q_{pi}) \end{cases} \quad (2.54)$$

Thay (2.52), (2.54) vào phương trình (2.50) ta được:

$$L_i = \frac{1}{2} \alpha_i \dot{q}_{ai}^2 + \frac{1}{2} \beta_i (\dot{q}_{ai} + \dot{q}_{pi})^2 + \gamma_i \cos q_{pi} (\dot{q}_{ai}^2 + \dot{q}_{ai} \dot{q}_{pi}) \quad (2.55)$$

Với:  $\alpha_i = m_{i1} l_1^2 + m_{i1} l_2^2 + I_{i1}$ ,  $\beta_i = m_{i2} l_2^2 + I_{i2}$ ,  $\gamma_i = m_{i2} l_1 l_2$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Như vậy, đã tìm được phương trình Lagrange cho mô hình động lực học các thanh tay máy robot. Tương tự viết phương trình Lagrange cho động lực học khâu chấp hành cuối:

$$L_p = \frac{1}{2} [m_p (\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2) + I_p \dot{\phi}_p^2] \quad (2.56)$$

Với:  $m_p$  là khối lượng và  $I_p$  là mô men quán tính của khâu chấp hành cuối.

Sau khi tính được các phương trình Lagrange, thay vào phương trình (2.37) và (2.38) và viết lại ta được phương trình:

$$M_t(q) \ddot{q} + C_t(q, \dot{q}) \dot{q} = \tau \quad (2.57)$$

Trong đó:

$$M_t = \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 & 0 & \varepsilon_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 & 0 & 0 & \varepsilon_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_3 & 0 & 0 & \varepsilon_3 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_1 & 0 & 0 & \beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_2 & 0 & 0 & \beta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_3 & 0 & 0 & \beta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_p \end{bmatrix}$$

$$C_t = \begin{bmatrix} \vartheta_1 & 0 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \vartheta_2 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vartheta_3 & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Trong đó:  $\delta_i = \alpha_i + \beta_i + 2\gamma_i \cos \mathbf{q}_{pi}$ ;  $\varepsilon_i = \beta_i + \gamma_i \cos \mathbf{q}_{pi}$ ;

$\vartheta_i = -2\gamma_i \dot{\mathbf{q}}_{pi} \sin \mathbf{q}_{pi}$ ;  $\mu_i = -\gamma_i \dot{\mathbf{q}}_{pi} \sin \mathbf{q}_{pi}$ ;  $\rho_i = \gamma_i \dot{\mathbf{q}}_{ai} \sin \mathbf{q}_{pi}$ ;

$\eta_i = \beta_i + \gamma_i \cos \mathbf{q}_{pi}$ ;  $i = 1, 2, 3$ .

Phương trình (2.57) là phương trình thể hiện lực tác động tổng quát vào tất cả các khớp của 3-RRR. Tuy nhiên thực tế chỉ cần tác động vào các khớp chủ động nên thay phương trình (2.44) vào phương trình (2.57) sẽ được phương trình lực tác động vào các khớp chủ động:

$$\mathbf{W}^T(\mathbf{M}_t(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_t(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}_a \quad (2.58)$$

Từ mối quan hệ động học của hệ kín ban đầu, ta có:

$$\dot{\mathbf{q}} = [\mathbf{I}, \partial \mathbf{q}_p / \partial \mathbf{q}_a, \partial \mathbf{X}_p / \partial \mathbf{q}_a]^T \dot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{W} \dot{\mathbf{q}}_a \quad (2.59)$$

Tiếp tục đạo hàm (2.59) theo thời gian ta được:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{W}} \dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{W} \ddot{\mathbf{q}}_a \quad (2.60)$$

$$\text{Với : } \dot{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}} \\ \dot{\mathbf{J}}_1 \\ \dot{\mathbf{J}}_2 \end{bmatrix}$$

Trong đó:  $\dot{\mathbf{I}}$  là ma trận chứa giá trị hằng số bằng 0 có kích thước 3x3, và các ma trận:

$$\dot{\mathbf{J}}_1 = \frac{\dot{J}_{zp} J_{oz} - J_{zp} \dot{J}_{oz}}{J_{oz}^2} \quad (2.61)$$

$$\dot{\mathbf{J}}_2 = \frac{\dot{J}_{oz}}{J_{oz}^2} \quad (2.62)$$

Bây giờ thay (2.59) và (2.60) vào (2.58) ta thu được mô hình động lực học của tay máy robot song song phẳng 3-RRR theo không gian khớp chủ động :



$$\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a = \boldsymbol{\tau}_a \quad (2.63)$$

Với:

$\mathbf{M}_a = \mathbf{W}^T \mathbf{M}_t \mathbf{W}$ , là ma trận quán tính có kích thước 3x3.

$\mathbf{C}_a = \mathbf{W}^T \mathbf{M}_t \dot{\mathbf{W}} + \mathbf{W}^T \mathbf{C}_t \mathbf{W}$ , là ma trận Coriolis và lực hướng tâm có kích thước 3x3.

## CHƯƠNG 3

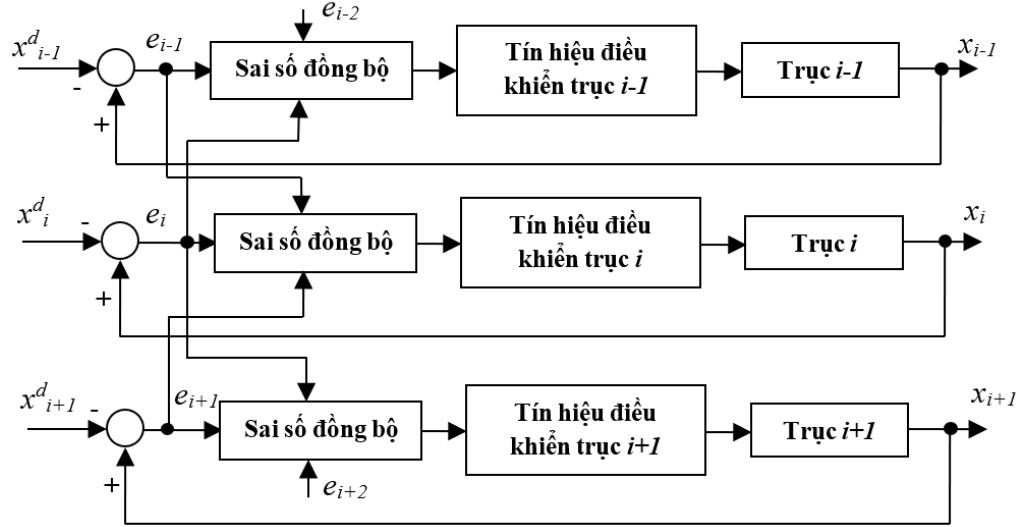
### NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG

#### 3.1. GIỚI THIỆU VỀ THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ

Vấn đề điều khiển tay máy robot song song phẳng đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới để nghiên cứu nâng cao thể mạnh của chúng. Ở nội dung chương 1 đã tổng quan lại các phương pháp điều khiển tay máy robot song song phẳng được công bố bởi các nhà khoa học đi trước. Đặc điểm chung của các phương pháp điều khiển tay máy robot song song phẳng đã kể ra ở chương 1 là đều dựa trên việc phát triển từ các thuật toán điều khiển nổi tiếng cho tay máy robot nối tiếp. Trong các thuật toán điều khiển truyền thống này, sự phối hợp hoạt động của các trục hoặc các chuỗi động học của tay máy robot song song không được xét đến. Hay nói cách khác, các thuật toán điều khiển truyền thống chỉ xét riêng sai số của từng chuỗi động học và cố gắng điều khiển chính xác riêng lẻ các khớp chủ động. Chưa xét đến mối quan hệ về sai số giữa các khớp chủ động với nhau. Điều này không phù hợp với bản chất động học của tay máy robot song là có sự phối hợp của các chuỗi động học cùng tác động lên khâu chấp hành cuối. Vì vậy, các thuật toán điều khiển truyền thống kể trên chưa phát huy hết hiệu quả và chất lượng hoạt động của tay máy robot song song. Từ quan điểm thực tế, các nghiên cứu về hệ thống nhiều cơ hệ phối hợp hoạt động đã cho thấy việc đồng bộ điều khiển hay phối hợp liên kết giữa các đối tượng riêng lẻ (ở đây là các chuỗi động học) hoạt động song song là cần thiết để nâng cao chất lượng hệ thống [29, 30]. Các nghiên cứu khác cũng đã chỉ ra rằng điều khiển đồng bộ vị trí có thể phối hợp giữa các cơ hệ riêng mà không cần xét đến nội lực (internal force) của hệ [31-33]. Do ưu điểm đơn giản và có tính hiệu quả cao nên phương pháp điều khiển đồng bộ gần đây đã thu hút sự quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học và cả những ứng dụng trong thực tiễn.

Nguyên lý cơ bản của thuật toán điều khiển đồng bộ được thể hiện trên hình 3.1 [34]. Như trên hình này ta có thể thấy, điểm khác biệt giữa thuật toán điều

khíên đồng bộ và thuật toán điều khiển phản hồi truyền thống là việc đề xuất một đại lượng gọi là sai số đồng bộ. Sai số này khác với sai số về quỹ đạo thông thường và có ảnh hưởng lớn đến độ chính xác bám quỹ đạo của robot.



**Hình 3.1.** Nguyên lý cơ bản điều khiển đồng bộ nhiều trục của robot song song

Trong những năm gần đây, có nhiều công trình nghiên cứu về điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song đã được công bố. Thuật toán điều khiển đồng bộ xét đến mối quan hệ động học xen kẽ giữa các khớp chủ động của tay máy robot song song, vì vậy kết quả làm tăng độ chính xác của khâu chấp hành cuối. Phương pháp điều khiển đồng bộ đầu tiên được đề xuất bởi Koren [35] để điều khiển cho máy công cụ nhiều trục. Phương pháp này cũng điều khiển dựa trên sai số, nhưng có xét đến sai số đồng bộ của các trục nên nó khác hẳn với phương pháp điều khiển PID truyền thống và mang lại độ chính xác cao hơn, phù hợp cho các cơ cấu động học song song. Phương pháp điều khiển này ngay sau đó đã được các nhà khoa học khác ứng dụng trong điều khiển chuyển động của cơ cấu nhiều trục [36, 37], điều khiển robot di động [38, 39], và đặc biệt là ứng dụng trong điều khiển bám quỹ đạo của tay máy robot song song [40-45].

Trong các công trình ứng dụng phương pháp điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song, Sun Dong [40] đã đề xuất một phương pháp tiếp cận ứng dụng sai số đồng bộ chéo để điều khiển bám quỹ đạo cho tay máy robot song song.

Bên cạnh đó, Lu Ren và các cộng sự đã đề xuất một thuật toán điều khiển đồng bộ lỗi cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do [43] dựa trên sự kết hợp giữa điều khiển đồng bộ và thích nghi. Shang Wei Wei đề xuất một thuật toán điều khiển đồng bộ [44] giữa các khớp chủ động để giải quyết bài toán điều khiển tay máy robot song song thừa bậc. Trong một nghiên cứu khác, Lu Ren và các cộng sự đã trình bày nghiên cứu thực nghiệm để so sánh và đánh giá các trường hợp điều khiển đồng bộ chỉ dựa trên sai số và điều khiển đồng bộ dựa trên mô hình động lực học. Kết quả cho thấy thuật toán điều khiển đồng bộ dựa trên mô hình động lực học mang lại kết quả tốt hơn so với trường hợp điều khiển chỉ dựa trên sai số. Tuy nhiên việc xây dựng thuật toán và thực hiện các thuật toán điều khiển đồng bộ dựa theo mô hình động lực học là công việc phức tạp và nhiều thách thức do tính xen kênh và sự phức tạp của mô hình động lực học tay máy robot song song. Các công trình đi trước chỉ ra ở trên đây vẫn khá sơ khai và đề xuất những thuật toán phức tạp, đòi hỏi khối lượng tính toán lớn, vì vậy khó mang lại hiệu quả tốt khi áp dụng cho điều khiển bám quỹ đạo của tay máy robot song song.

Trong chương này, thuyết minh của đề tài nghiên cứu trình bày việc đề xuất một thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho tay máy robot song song phẳng. Thuật toán điều khiển đề xuất dựa trên việc kết hợp sử dụng sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo với thuật toán điều khiển tính mô-men và phương pháp bù các thành phần bất định. Các thành phần bất định bao gồm sai số mô hình động lực học, các thành phần lực ma sát và nhiễu loạn tác động từ bên ngoài. Các thành phần bất định này được bù thích nghi bằng các mạng nơ-ron nhân tạo và các bộ bù sai số. Thuật toán học thích nghi của các mạng nơ-ron và các bộ bù được thực hiện online trong quá trình robot hoạt động. Sự ổn định của hệ thống kín được đảm bảo và được chứng minh bằng lý thuyết ổn định Lyapunov.

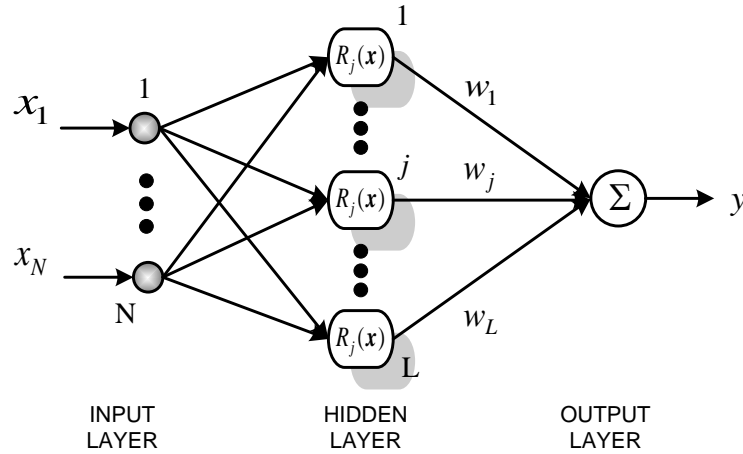
### 3.2. MẠNG NƠ-RON XUYÊN TÂM

Trong mục này, cấu trúc và các phương trình tính toán của mạng nơ-ron xuyên tâm được trình bày để làm cơ sở áp dụng cho bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài nghiên cứu thiết kế.

Cấu trúc của mạng nơ-ron xuyên tâm mà đề tài sử dụng được biểu diễn như trên Hình 3.2. Đây là một mạng nơ-ron gồm 3 lớp, trong đó các nơ-ron trong lớp ẩn được xác định là các hàm xuyên tâm cục bộ. Hàm cơ sở của các nơ-ron trong lớp ẩn được biểu diễn bởi phương trình:

$$R_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right), \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (3.1)$$

trong đó  $x$  là vector đầu vào có kích thước tổng quát  $N$ ,  $c_j$  là vector tọa độ tâm của hàm có kích thước bằng với  $x$ ;  $\sigma_j$  là tham số về sự thay đổi của hàm cơ bản;  $L$  là số nơ-ron trong lớp ẩn; và  $\|$  là ký hiệu của chuẩn Euclidean.



**Hình 3.2.** Cấu trúc của một mạng nơ-ron xuyên tâm 3 lớp, có  $L$  nơ-ron ở lớp ẩn

Đầu ra của mạng nơ-ron xuyên tâm được tính bằng phương pháp trọng tâm theo công thức:

$$y = \sum_{j=1}^L w_j R_j(x) = W^T R(x) \quad (3.3)$$

trong đó  $w_j$  là trọng số tương ứng với nơ-ron thứ  $j^{\text{th}}$ ;  $W$  là vector của tất cả các trọng số kết nối giữa lớp ẩn và lớp ra; và  $R(x)$  là vector của các hàm xuyên tâm ở lớp ẩn.

### 3.3. ĐỀ XUẤT BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ THÍCH NGHI CHO TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG DẠNG TỔNG QUÁT

Để thiết kế bộ điều khiển cho tay máy robot song song, đầu tiên chúng ta định nghĩa sai số bám quỹ đạo góc của các khớp chủ động như sau:

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_{da}(t) - \mathbf{q}_a(t) \quad (3.4)$$

trong đó  $\mathbf{q}_{da}(t) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  là quỹ đạo mong muốn của các khớp chủ động;  $\mathbf{q}_a(t) \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  là quỹ đạo thực của các khớp chủ động;  $N_a$  là số bậc tự do (cũng là số khớp chủ động) của tay máy robot song song.

Đối với phương pháp điều khiển đồng bộ, mục tiêu điều khiển không chỉ làm cho sai số bám quỹ đạo của riêng lẻ mỗi khớp chủ động tiến về giá trị không ( $e_{ai}(t) \rightarrow 0, i = 1, 2, \dots, N_a$ ), mà phải điều khiển để tất cả các sai số của các khớp chủ động cùng bằng nhau trong quá trình bám quỹ đạo của robot:

$$e_{a1}(t) = e_{a2}(t) = \dots = e_{aN_a}(t) \quad (3.5)$$

Với mục tiêu nêu trên, các sai số đồng bộ được định nghĩa như sau:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1(t) = e_{a1}(t) - e_{a2}(t) \\ \mathcal{E}_2(t) = e_{a2}(t) - e_{a3}(t) \\ \dots \\ \mathcal{E}_{N_a}(t) = e_{aN_a}(t) - e_{a1}(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

Vector sai số đồng bộ được định nghĩa:  $\mathcal{E} = [\mathcal{E}_1(t), \mathcal{E}_2(t), \dots, \mathcal{E}_{N_a}(t)]^T$ . Với định nghĩa về sự đồng bộ như vậy, tín hiệu mô-men điều khiển tại các khớp chủ động  $\tau_{ai}$  sẽ được thiết kế để điều khiển các sai số tiến về giá trị không  $e_{ai}(t) \rightarrow 0$  và cùng lúc với nhau để đồng bộ chuyển động của tất cả các khớp chủ động ( $i = 1, 2, \dots, N_a$ ).

Để làm cho phù hợp cả sai số vị trí và sai số đồng bộ, khái niệm về sai số xen kênh được định nghĩa nhằm xây dựng một phương pháp hiệu quả để tính đến sự

ảnh hưởng qua lại lẫn nhau giữa các trục chuyển động. Sai số xen kênh được định nghĩa như sau:

$$\begin{cases} e_{a1}^* = e_{a1} + \sigma \int_0^t (\varepsilon_1 - \varepsilon_{aNa}) dw \\ e_{a2}^* = e_{a2} + \sigma \int_0^t (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) dw \\ \dots \\ e_{aNa}^* = e_{aNa} + \sigma \int_0^t (\varepsilon_{Na} - \varepsilon_{aNa-1}) dw \end{cases} \quad (3.7)$$

trong đó  $\sigma$  là tham số dương,  $w$  là biến thời gian.

Tiếp theo, vector vận tốc tham chiếu và gia tốc tham chiếu đồng bộ được định nghĩa như sau:

$$\dot{\mathbf{q}}_{da}^r = \dot{\mathbf{q}}_{da} + \sigma \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.8)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{da}^r = \ddot{\mathbf{q}}_{da} + \sigma \Delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (3.9)$$

trong đó  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1 - \varepsilon_{Na}, \varepsilon_2 - \varepsilon_1, \varepsilon_3 - \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{Na} - \varepsilon_{Na-1}]^T$  và  $\Delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = [\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_{Na}, \dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_2, \dots, \dot{\varepsilon}_{Na} - \dot{\varepsilon}_{Na-1}]^T$ .

Bộ điều khiển đồng bộ thích nghi đề xuất cho tay máy robot song song phẳng ở dạng tổng quát được biểu diễn bởi phương trình sau:

$$\boldsymbol{\tau}_a = \hat{\mathbf{M}}_a (\ddot{\mathbf{q}}_{da}^r + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_a^*) + \hat{\mathbf{C}}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \boldsymbol{\tau}_{cp} + \boldsymbol{\tau}_{er} \quad (3.10)$$

trong đó  $\mathbf{e}_a^* = [e_{a1}^*, e_{a2}^*, \dots, e_{aNa}^*]^T$  là vector của các sai số xen kênh;  $\mathbf{K}_v = \text{diag}\{k_{v1}, k_{v2}, \dots, k_{vNa}\}$  và  $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{pNa}\}$  là các ma trận tham số dương;  $\boldsymbol{\tau}_{cp} \in \mathcal{R}^{N_{ax1}}$  là bộ điều khiển bù các thành phần bất định trong đó chứa một dãy các mạng nơ-ron xuyên tâm để ước lượng vector  $\Delta \boldsymbol{\tau}_a$ . Bởi vì bộ điều khiển  $\boldsymbol{\tau}_{cp}$  không thể ước lượng được hoàn hảo  $\Delta \boldsymbol{\tau}_a$ , nên thành phần  $\boldsymbol{\tau}_{er}$  được thêm vào bộ điều khiển để bù cho các sai số của ước lượng. Sơ đồ khối của thuật toán điều khiển đề xuất được biểu diễn như trên Hình 3.3.

Bộ điều khiển được đề xuất có những đóng góp mới so với các công trình đi trước như sau: Đầu tiên, sự kết hợp giữa sai số đồng bộ và sai số xen kênh với thuật toán điều khiển tính mô-men mang lại những ưu điểm của cả hai phương pháp như độ chính xác cao và khối lượng tính toán ít. Đóng góp quan trọng thứ

2 là trong bộ điều khiển thiết kế thêm các bộ ước lượng sai số với thuật toán thích nghi online, nhằm hỗ trợ bù sai số ước lượng cho các mạng nơ-ron xuyên tâm.

Từ các phương trình (2.63) và (3.10) chúng ta có:

$$\ddot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_a^* = \hat{\mathbf{M}}_a^{-1} (\Delta \boldsymbol{\tau}_a - \boldsymbol{\tau}_{cp} - \boldsymbol{\tau}_{er}) \quad (3.11)$$

Trong phương trình (3.11), chúng ta định nghĩa:

$$\boldsymbol{\rho} = \hat{\mathbf{M}}_a^{-1} \Delta \boldsymbol{\tau}_a \quad (3.12)$$

Khi đó bộ điều khiển bù sẽ được viết như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_{cp} = \hat{\mathbf{M}}_a \hat{\boldsymbol{\rho}} \quad (3.13)$$

trong đó  $\hat{\boldsymbol{\rho}}$  là vector gồm một dãy các mạng nơ-ron xuyên tâm để ước lượng online cho thành phần  $\Delta \boldsymbol{\tau}_a$ . Cấu trúc của mạng nơ-ron xuyên tâm đã được trình bày ở mục 3.2.

Hàm cơ sở của các nơ-ron ở lớp ẩn được chọn là hàm Gaussian và được biểu diễn bởi phương trình:

$$R_{ij}(\mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{c}_{ij}\|^2}{2m_{ij}^2}\right), j = 1, 2, \dots, L; i = 1, 2, \dots, N_a \quad (3.14)$$

trong đó  $\mathbf{x}$  là vector đầu vào có kích thước gồm  $N$  phần tử;  $\mathbf{c}_{ij}$  là vector tâm của hàm cơ sở và có cùng kích thước với vector  $\mathbf{x}$ ;  $m_{ij}$  là tham số đặc trưng cho sự lan tỏa của hàm cơ sở;  $L$  là số nơ-ron trong lớp ẩn; và  $\|\cdot\|$  là ký hiệu của chuẩn Euclidean.

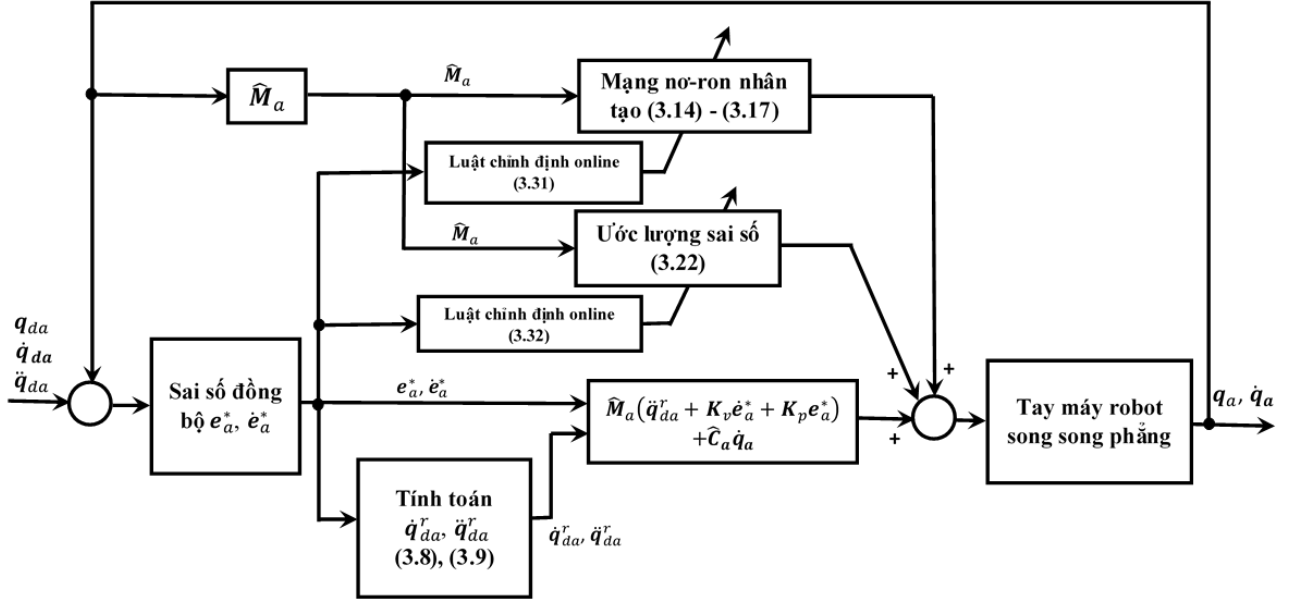
Tín hiệu ra của mạng nơ-ron xuyên tâm được tính bằng các công thức sau theo phương pháp trọng tâm:

$$\hat{\rho}_i = \sum_{j=1}^L \hat{w}_{ij} R_{ij}(\mathbf{x}_i) = \hat{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i) \quad (3.15)$$

$$\hat{\mathbf{W}}_i = [\hat{w}_{i1}, \hat{w}_{i2}, \dots, \hat{w}_{iL}]^T, i = 1, 2, \dots, N_a \quad (3.16)$$

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i) = [R_{i1}(\mathbf{x}_i), R_{i2}(\mathbf{x}_i), \dots, R_{iL}(\mathbf{x}_i)]^T, i = 1, 2, \dots, N_a \quad (3.17)$$





**Hình 3.3.** Sơ đồ khối cấu trúc của bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất

Vector đầu vào của mỗi mạng nơ-ron xuyên tâm:

$$\mathbf{x}_i = [e_{ai}^*, \dot{e}_{ai}^*]^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_a \quad (3.18)$$

trong đó  $e_{ai}^*$  và  $\dot{e}_{ai}^*$  lần lượt là sai số đồng bộ chéo và đạo hàm của sai số đồng bộ chéo của mỗi khớp chủ động của tay máy robot song song.

Khi đó, vector  $\hat{\boldsymbol{\rho}} \in \mathbb{R}^3$  có thể được viết lại như sau:

$$\hat{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_2 \\ \dots \\ \hat{\rho}_{N_a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{W}}_1^T \mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) \\ \hat{\mathbf{W}}_2^T \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) \\ \dots \\ \hat{\mathbf{W}}_{N_a}^T \mathbf{R}_{N_a}(\mathbf{x}_{N_a}) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Nếu với một số lượng đủ lớn số nơ-ron trong lớp ẩn, sẽ tồn tại các giá trị trọng số và tham số lý tưởng của mạng nơ-ron ước lượng được chính xác các thành phần bất định của tay máy robot. Khi đó vector  $\boldsymbol{\rho}$  được biểu diễn như sau:

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1^{*T} \mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) \\ \mathbf{W}_2^{*T} \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) \\ \dots \\ \mathbf{W}_{N_a}^{*T} \mathbf{R}_{N_a}(\mathbf{x}_{N_a}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_1 \\ \mathcal{G}_2 \\ \dots \\ \mathcal{G}_{N_a} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

trong đó  $\mathbf{W}_i^*$  là các vector trọng số lý tưởng bị chặn trên của lớp ra của mạng nơ-ron;  $\vartheta_i$  là sai số ước lượng.

### 3.4. THIẾT KẾ THUẬT TOÁN CHỈNH ĐỊNH ONLINE VÀ PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH CỦA HỆ THỐNG

Từ các công thức (3.12), (3.13), (3.19) và (3.20) thay vào phương trình (3.11) chúng ta có:

$$\ddot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_a^* = \begin{bmatrix} \widetilde{\mathbf{W}}_1^T \mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) \\ \widetilde{\mathbf{W}}_2^T \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) \\ \dots \\ \widetilde{\mathbf{W}}_{Na}^T \mathbf{R}_{Na}(\mathbf{x}_{Na}) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\vartheta} - \widehat{\mathbf{M}}_a^{-1} \boldsymbol{\tau}_{er} \quad (3.21)$$

trong đó  $\widetilde{\mathbf{W}}_i = \mathbf{W}_i^* - \widehat{\mathbf{W}}$  là sai số của các trọng số ước lượng;  $\boldsymbol{\vartheta} = [\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_{Na}]^T$  là vector của các sai số.

Tiếp theo, chúng ta định nghĩa sai số ước lượng như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_{er} = \widehat{\mathbf{M}}_a \hat{\boldsymbol{\vartheta}} \quad (3.22)$$

trong đó  $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$  là giá trị ước lượng của sai số  $\boldsymbol{\vartheta}$ .

Sau đó, thay (3.22) và (3.21) chúng ta có:

$$\ddot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_a^* + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_a^* = \begin{bmatrix} \widetilde{\mathbf{W}}_1^T \mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) \\ \widetilde{\mathbf{W}}_2^T \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) \\ \dots \\ \widetilde{\mathbf{W}}_{Na}^T \mathbf{R}_{Na}(\mathbf{x}_{Na}) \end{bmatrix} + \widetilde{\boldsymbol{\vartheta}} \quad (3.23)$$

trong đó  $\widetilde{\boldsymbol{\vartheta}} = \boldsymbol{\vartheta} - \hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ .

Nếu viết triển khai thành các phương trình cụ thể, phương trình (3.23) sẽ là một hệ các phương trình:

$$\begin{cases} \ddot{e}_{a1}^* + k_{v1} \dot{e}_{a1}^* + k_{p1} e_{a1}^* = \widetilde{\mathbf{W}}_1^T \mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) + \tilde{\vartheta}_1 \\ \ddot{e}_{a2}^* + k_{v2} \dot{e}_{a2}^* + k_{p2} e_{a2}^* = \widetilde{\mathbf{W}}_2^T \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) + \tilde{\vartheta}_2 \\ \dots \\ \ddot{e}_{aNa}^* + k_{vNa} \dot{e}_{aNa}^* + k_{pNa} e_{aNa}^* = \widetilde{\mathbf{W}}_{Na}^T \mathbf{R}_{Na}(\mathbf{x}_{Na}) + \tilde{\vartheta}_{Na} \end{cases} \quad (3.24)$$

Với mỗi khớp chủ động, chúng ta định nghĩa các vector trạng thái như sau:

$\mathbf{X}_i = [e_{ai}^*, \dot{e}_{ai}^*]^T, i = 1, 2, \dots, N_a$ . Khi đó, chúng ta có phương trình trạng thái:

$$\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{X}_i + \mathbf{B}_i (\widetilde{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i) + \tilde{\vartheta}_i), i = 1, 2, \dots, N_a \quad (3.25)$$

trong đó:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_{pi} & -k_{vi} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Phương trình Lyapunov cho mỗi khớp chủ động được viết như sau:

$$\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i = -\mathbf{Q}_i \quad (3.27)$$

trong đó  $\mathbf{P}_i$  và  $\mathbf{Q}_i$  là các ma trận xác định dương ( $i = 1, 2, \dots, N_a$ ). Với mỗi phương trình, chúng ta có thể chọn một ma trận xác định dương  $\mathbf{Q}_i$ , rồi sau đó giải phương trình (3.27) để tìm ma trận xác định dương  $\mathbf{P}_i$ .

Để phân tích sự ổn định của hệ thống điều khiển, một hàm Lyapunov xác định dương được chọn như sau:

$$V = \sum_{i=1}^3 \mathbf{X}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{X}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \mu_i^{-1} \widetilde{\mathbf{W}}_i^T \widetilde{\mathbf{W}}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \eta_i^{-1} \tilde{\vartheta}_i^2 \quad (3.28)$$

trong đó  $\tilde{\vartheta}_i = \vartheta_i - \hat{\vartheta}_i$ ;  $\mu_i$  và  $\eta_i$  là các hệ số học có giá trị dương;  $i = 1, 2, \dots, N_a$ .

Đạo hàm V theo thời gian chúng ta có:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 (\dot{\mathbf{X}}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{X}_i + \mathbf{X}_i^T \mathbf{P}_i \dot{\mathbf{X}}_i) - \sum_{i=1}^3 \mu_i^{-1} \widetilde{\mathbf{W}}_i^T \dot{\widetilde{\mathbf{W}}}_i - \sum_{i=1}^3 \eta_i^{-1} \tilde{\vartheta}_i \dot{\tilde{\vartheta}}_i \quad (3.29)$$

Thay các phương trình (3.24) và (3.27) vào phương trình (3.29) chúng ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\sum_{i=1}^3 \mathbf{X}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{X}_i + \sum_{i=1}^3 \mathbf{X}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \widetilde{\mathbf{W}}_i^T \mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i) + \sum_{i=1}^3 \mathbf{X}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \tilde{\vartheta}_i - \\ & - \sum_{i=1}^3 \mu_i^{-1} \widetilde{\mathbf{W}}_i^T \dot{\widetilde{\mathbf{W}}}_i - \sum_{i=1}^3 \eta_i^{-1} \tilde{\vartheta}_i \dot{\tilde{\vartheta}}_i \end{aligned} \quad (3.30)$$

Từ phương trình (3.30), chúng ta chọn luật chỉnh định online cho các trọng số đầu ra của các mạng nơ-ron hàm cơ sở tuyến tâm và luật chỉnh định online của các bộ ước lượng sai số như sau:

$$\dot{\widetilde{\mathbf{W}}}_i = \mu_i \mathbf{X}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \mathbf{R}_i(\mathbf{x}_i) \quad (3.31)$$

$$\dot{\tilde{\vartheta}}_i = \eta_i \mathbf{X}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \quad (3.32)$$

Bây giờ, thay các luật chỉnh định (3.31) và (3.32) vào phương trình (3.30) chúng ta có được kết quả:

$$\dot{V} = -\sum_{i=1}^3 \mathbf{X}_i^T \mathbf{Q}_i \mathbf{X}_i \leq 0 \quad (3.33)$$

Bởi vì  $\mathbf{Q}_i$  là một ma trận xác định dương,  $\dot{V} = 0$  chỉ khi  $\mathbf{X}_i = \mathbf{0}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_a$ . Vì vậy, hệ thống ổn định tiệm cận theo  $\mathbf{X}_i$ . Điều đó có nghĩa là:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{X}_i = \mathbf{0}, i = 1, 2, \dots, N_a$$

Hoặc tương đương với ( $i = 1, 2, \dots, N_a$ ):

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} q_{ai} = q_{dai} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_i = 0 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}_{ai} = \dot{q}_{dai} \end{cases}$$

Như vậy, trong mục này, chúng ta đã chứng minh được rằng với bộ điều khiển đồng bộ thích nghi được đề xuất và các thuật toán chỉnh định online, các giá trị thực của biến góc khớp chủ động hội tụ về các giá trị mong muốn.

Trong chương tiếp theo, bộ điều khiển được đề xuất này sẽ được áp dụng vào tay máy robot song song 3 bậc tự do để kiểm nghiệm.

## CHƯƠNG 4

### MÔ PHỎNG VÀ KIỂM NGHIỆM

#### 4.1. XÂY DỰNG MÔ HÌNH CỦA HỆ THỐNG TRÊN MATLAB-SIMULINK

Sơ đồ khối cấu trúc của hệ thống mô phỏng được thể hiện như trên Hình 4.1. Trong đó gồm các khối như sau:

- **Khối tạo tín hiệu đầu vào (Input)**

Nhiệm vụ xây dựng các giá trị đặt là một đường tròn có bán kính  $R$  và tâm của đường tròn là  $(X, Y)$  theo công thức như sau:

$$\begin{cases} x_p = X + R \cos(\omega u) \\ y_p = Y + R \sin(\omega u) \end{cases} \quad (4.1)$$

Trong đó  $\omega$  là vận tốc góc của mô hình và  $u$  là thời gian mô phỏng. Và giá trị đặt của góc lệch  $\phi_p$  bằng 0.

Tiếp theo là tính toán các giá trị  $\dot{Z} = [\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{\phi}_p]^T$  và  $\ddot{Z} = [\ddot{x}_p, \ddot{y}_p, \ddot{\phi}_p]^T$ .

- **Khối động học ngược (Inverse)**

Trong khối này, các công thức (2.3) và (2.6) được sử dụng để tính toán các giá trị yêu cầu của  $\theta_a$  và  $\theta_p$ .

- **Khối tính toán giá trị đặt cho khớp chủ động (Jacobian)**

Từ công thức (2.20) tiến hành lấy đạo hàm theo thời gian ta được:

$$\ddot{\theta}a = \dot{J}_{az} \dot{Z} + J_{az} \ddot{Z} \quad (4.2)$$

Trong đó: 
$$J_{az} = (J_a^2)^{-1} (J_{z1} J_a - J_{z1} J_a) \quad (4.3)$$

Dựa trên các công thức về động học chúng ta tiến hành tính toán các giá trị của vận tốc góc khớp chủ động  $\dot{\theta}_a$  và  $\ddot{\theta}_a$ .

- **Khối động học thuận (forward kinematic)**

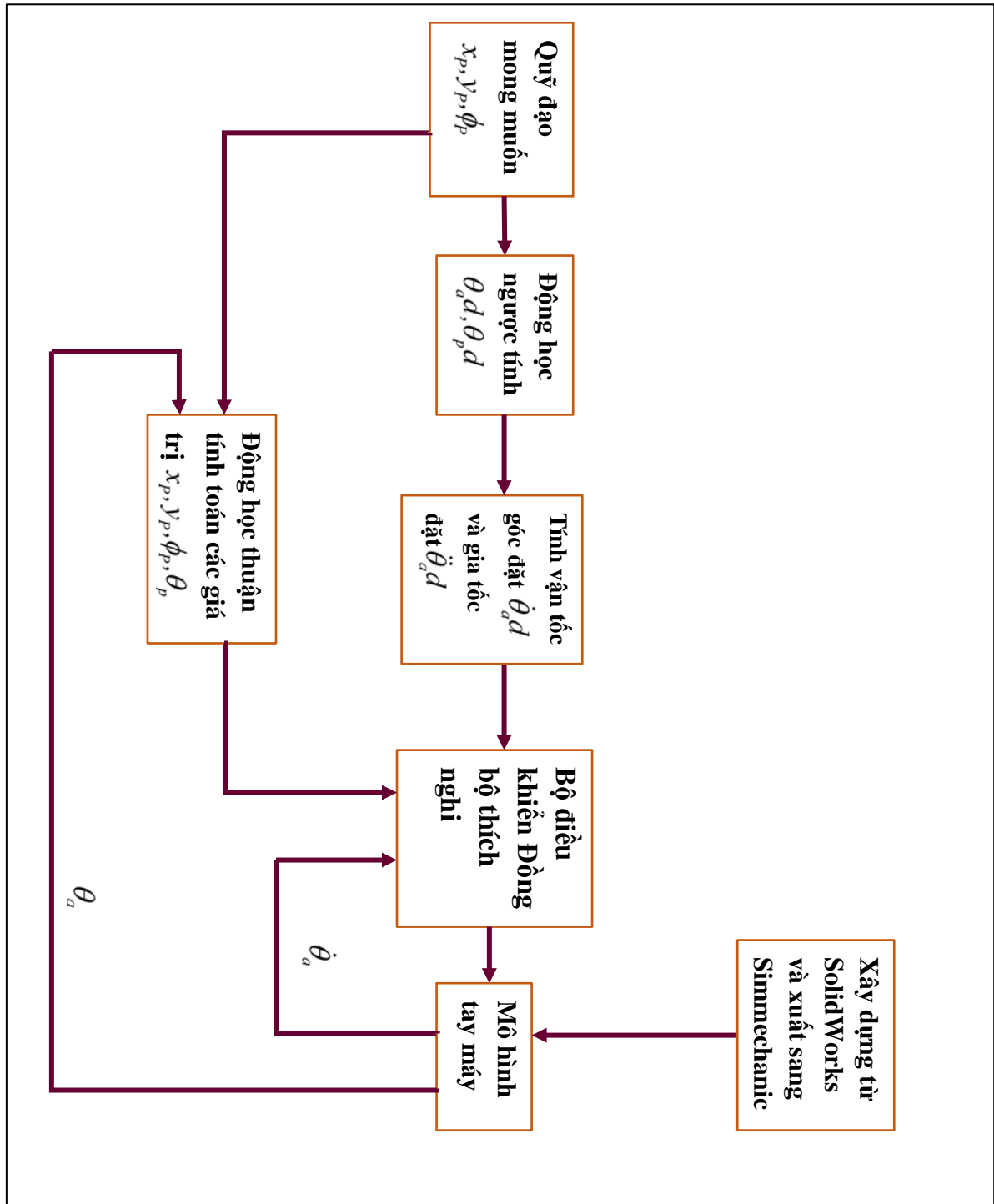
Từ giá trị góc  $\theta_a$  đo được từ mô hình robot, kết hợp với giá trị đặt ban đầu, ta áp dụng phương pháp Newton –Rapson ta tính được giá trị thực tế của  $Z = [x_p, y_p, \phi_p]^T$  và  $\theta_p$ .

- **Khối điều khiển (controller)**

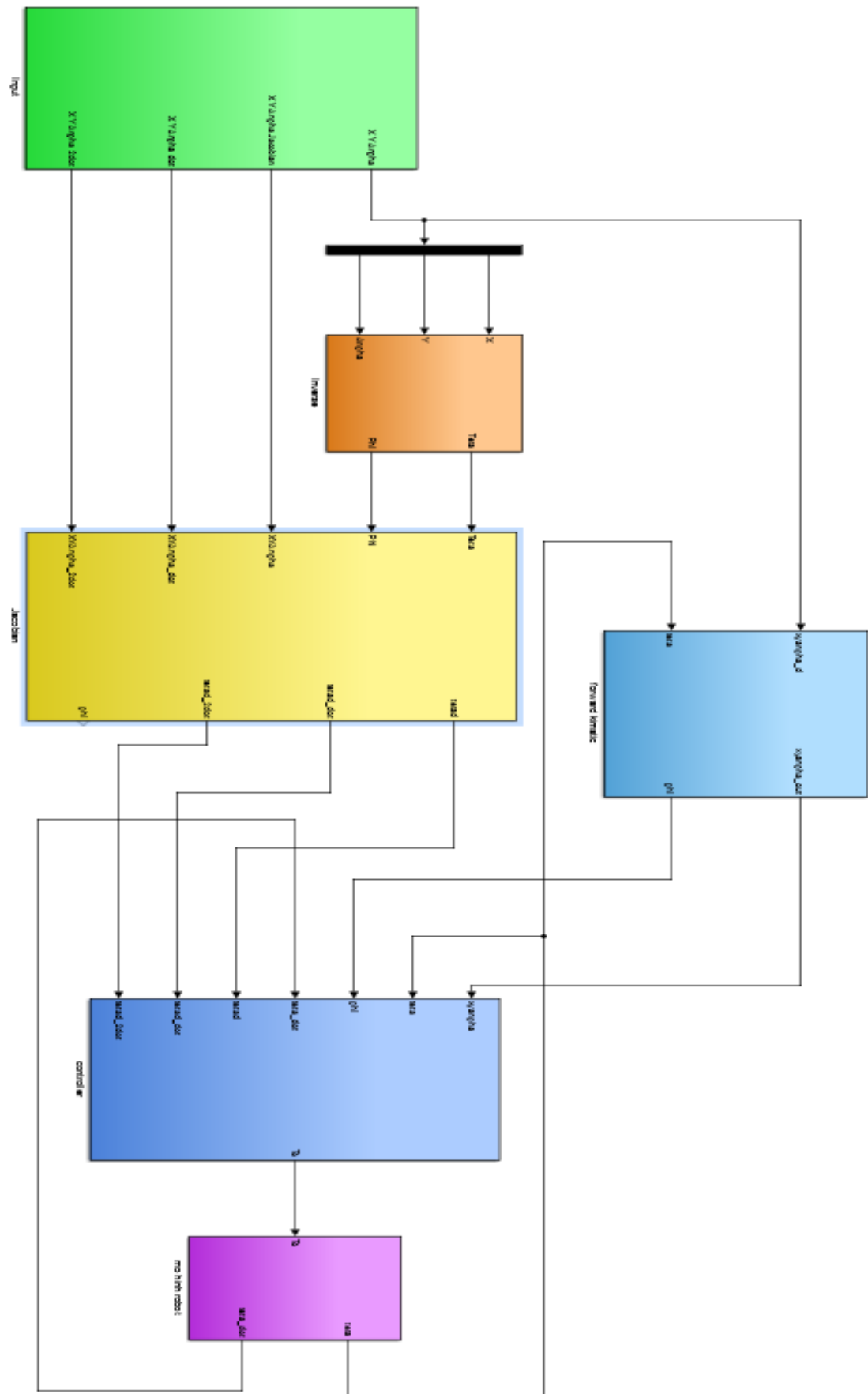
Dựa trên các giá trị đầu vào đã có, ta tiến hành xây dựng phương trình (3.10) để tính toán momen điều khiển đưa vào các khớp chủ động của robot.

- **Khối mô hình robot**

Khối này chứa mô hình robot được xây dựng trên phần mềm SolidWorks và sau đó chuyển sang Simmechanic của Matlab-Simulink. Khối có đầu vào nhận giá trị momen điều khiển và xuất ra giá trị góc khớp chủ động  $\theta_a$  và vận tốc góc khớp chủ động  $\dot{\theta}_a$ .



**Hình 4.1.** Sơ đồ khối cấu trúc mô phỏng hệ thống



**Hình 4.2.** Kết quả xây dựng thuật toán trên Matlab

## 4.2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG 3 BẬC TỰ DO TRÊN SOLIDWORKS

Bằng cách sử dụng phần mềm SolidWorks và tiện ích Simscape Multibody Link, chúng ta có thể xây dựng mô hình cơ khí của robot 3RRR thông qua các bước :

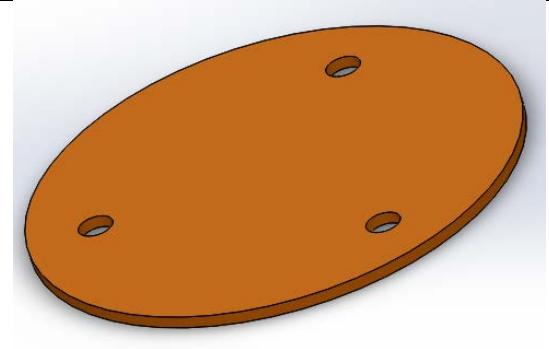
**Bước 1:** Thiết kế các thành phần của robot là thanh L1, L2, đế, cơ cấu chấp hành cuối.

Bằng việc sử dụng chức năng “Part” trong SolidWork, ta có thể xây dựng các thành phần của robot như bảng sau.

**Bảng 4.2.** Mô phỏng các thành phần cơ khí của robot

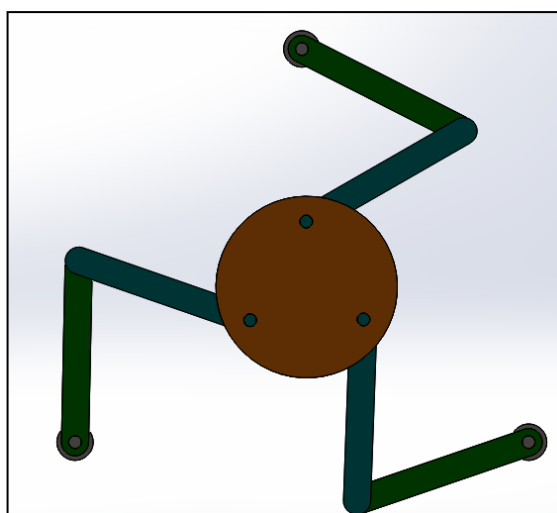
<i>Tên</i>	<i>Số lượng</i>	<i>Thông tin</i>	<i>Hình ảnh</i>
<b>Đế</b>	3	Vật liệu: Thép Khối lượng: 0.3 kg Màu sắc: Xám	
<b>Thanh L1</b>	3	Vật liệu: Thép Khối lượng: 0.5 kg Màu sắc: Xanh lá cây Độ dài: 0.2 m	
<b>Thanh L2</b>	3	Vật liệu: Thép Khối lượng: 0.5 kg Màu sắc: Xanh cỏ Độ dài: 0.2 m	



<b>Cơ cấu chấp hành</b>	1	Vật liệu: Thép Khối lượng: 1.2 kg Màu sắc: Màu nâu. Bán kính: 0.1 m	
-------------------------	---	--	--

**Bước 2:** Lắp ghép các thành phần của robot lại với nhau thành một mô hình hoàn chỉnh.

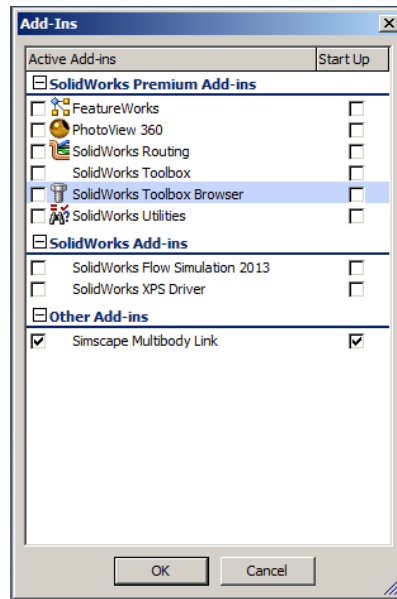
Sau khi đã hoàn thành thiết kế các thành phần của robot, chúng ta sử dụng chức năng “Assembly” để tiến hành lắp ghép các chi tiết với nhau. Trong chức năng Assembly, chúng ta lắp ghép chi tiết bằng việc sử dụng tính năng “Mate”. Tính năng này cho phép liên kết 2 mặt của 2 chi tiết khác nhau với nhiều kiểu liên kết khác nhau. Đối với mô hình robot 3RRR nhóm chủ yếu sử dụng kiểu liên kết đồng tâm và kiểu liên kết trùng hợp.



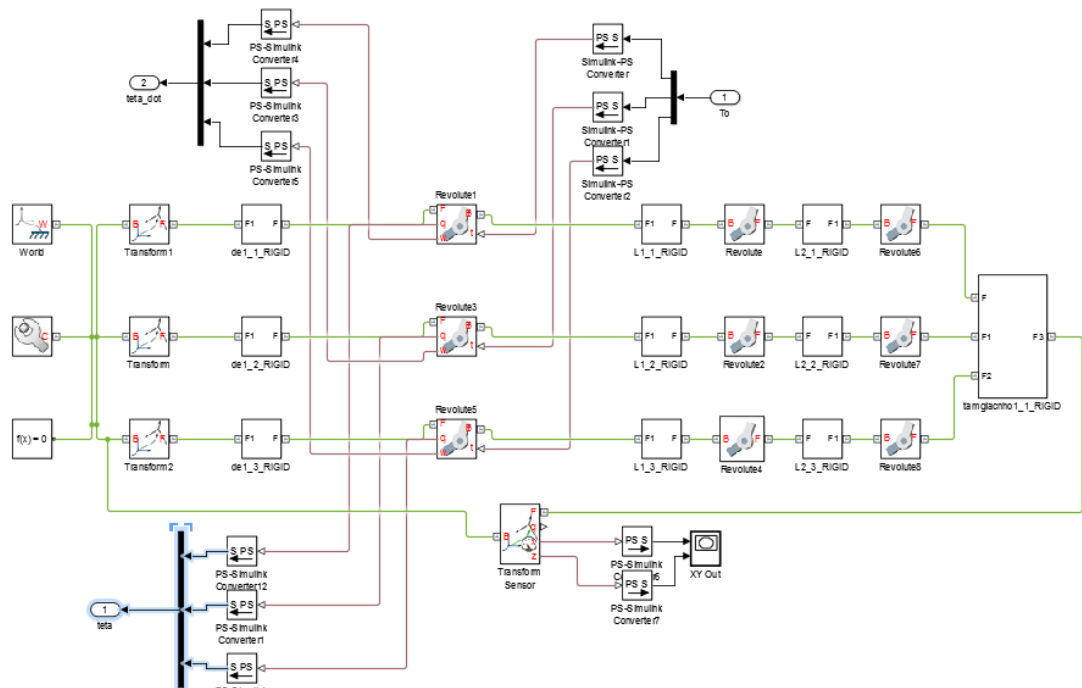
**Hình 4.3.** Mô hình robot đã được lắp ghép

**Bước 3:** Sử dụng tiện ích Simscape Multibody Link để đưa mô hình sang Matlab

Quá trình lắp ghép hoàn tất, chúng ta vào mục Simmechanic Link chọn Export, sau đó chọn mục Simscape Multibody. Lúc này phần mềm tự động chuyển mô hình robot từ SolidWorks sang Matlab.



**Hình 4.4.** Tiện ích Simscape Multibody Link



**Hình 4.5.** Mô hình cơ khí của Tobot 3RRR từ Solidworks đã tích hợp vào trên Simulink

### 4.3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ THÍCH NGHỊ

Trong mô hình mô phỏng, các tham số của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do được xác định từ phần mềm SolidWorks. Các tham số này được thể hiện như trên Bảng 4.2.

**Bảng 4.2.** Giá trị các tham số của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do

<i>Tên tham số</i>	<i>Mô tả</i>	<i>Giá trị</i>	<i>Đơn vị</i>
$l_1$	Chiều dài của thanh nối phía nối với khớp chủ động	0.4	m
$l_2$	Chiều dài của thanh nối phía nối với khâu chấp hành cuối	0.6	m
$l_3$	Kích thước của tấm nối đầu cuối	0.2	m
$l_{c1}$	Vị trí trọng tâm của thanh nối phía nối với khớp chủ động	0.2	m
$l_{c2}$	Vị trí trọng tâm của thanh nối phía nối với khâu chấp hành cuối	0.3	m
$m_{i1}$	Khối lượng của thanh nối phía nối với khớp chủ động	5.12	kg
$m_{i2}$	Khối lượng của thanh nối phía nối với khâu chấp hành cuối	7.39	kg
$m_p$	Khối lượng của tấm nối đầu cuối	3.84	kg
$I_{i1}$	Mômen quán tính của thanh nối thứ $i$ phía nối với khớp chủ động	$91 \times 10^{-3}$	kg.m <sup>2</sup>
$I_{i2}$	Mômen quán tính của thanh nối thứ $i$ phía nối với khâu chấp hành cuối	$267 \times 10^{-3}$	kg.m <sup>2</sup>
$I_p$	Mômen quán tính của tấm nối đầu cuối	$65 \times 10^{-3}$	kg.m <sup>2</sup>

Để đánh giá sự hiệu quả của bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất, kết quả mô phỏng của bộ điều khiển được thực hiện cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do và so sánh với 2 bộ điều khiển nổi tiếng đã được công bố trước đây:

- 1) Bộ điều khiển tính mô-men cho tay máy robot song song đã được công bố trong tài liệu [46]:

$$\tau_a = \hat{M}_a(\ddot{q}_{da} + K_v \dot{e}_a + K_p e_a) + \hat{C}_a \dot{q}_a \quad (4.4)$$

trong đó các ma trận tham số  $K_v$  và  $K_p$  được chọn bằng:  $K_v = \text{diag}\{25,25,25\}$ ,  $K_p = \text{diag}\{50,50,50\}$ .

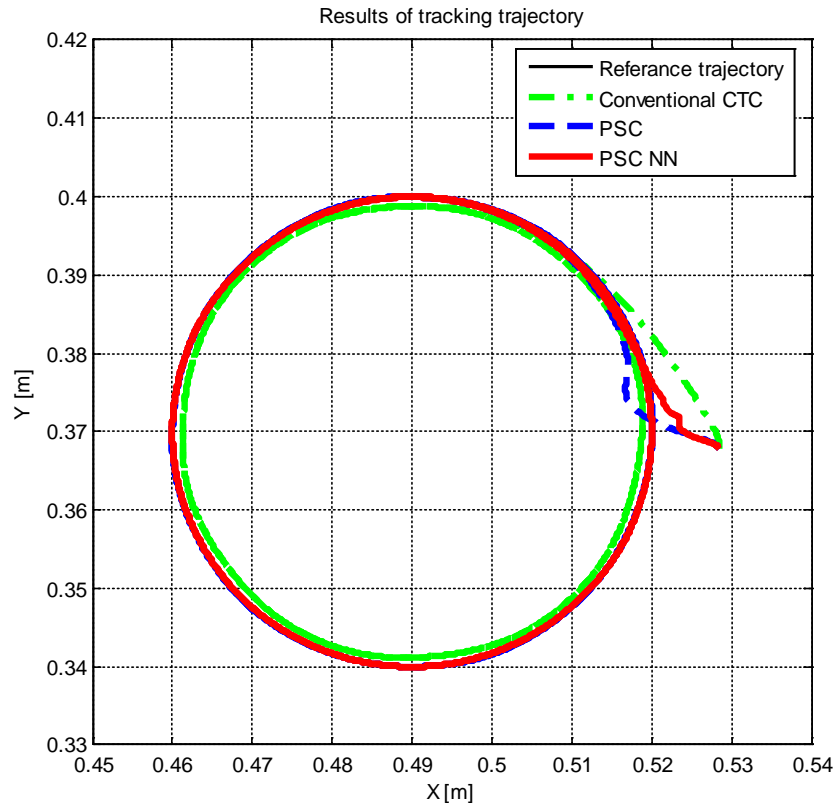
- 2) Bộ điều khiển đồng bộ thích nghi chưa có bù thích nghi các thành phần bất định và nhiễu loạn:

$$\tau_a = \hat{M}_a(\ddot{q}_{da}^r + K_v \dot{e}_a^* + K_p e_a^*) + \hat{C}_a \dot{q}_a$$

(4.5)

trong đó  $K_v$  và  $K_p$  được chọn bằng:  $K_v = \text{diag}\{25,25,25\}$ ,  $K_p = \text{diag}\{50,50,50\}$ .

- 3) Bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất mô tả bởi phương trình tổng quát (3.10). Các ma trận  $K_v$  và  $K_p$  có cùng giá trị với hai trường hợp 1) và 2) ở trên. Các tham số khác được chọn là:  $\sigma = 0.1$ ; Số nơ-ron trong lớp ẩn là  $L = 25$ ; các tham số vector tâm của hàm cơ sở xuyên tâm là  $c_{jk} = [-0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5]^T$ ,  $j = 1, 2, 3, 4, 5$ ;  $k = 1, 2, 3, 4, 5$ . Những tham số này có được bằng cách chỉnh định nhiều lần để chọn tham số tốt nhất.



**Hình 4.6.** So sánh kết quả điều khiển bám quỹ đạo giữa 3 trường hợp: Điều khiển tính mô-men (đường màu xanh lá cây), Điều khiển đồng bộ tính mô-men (đường màu xanh da trời) và bộ điều khiển đồng bộ thích nghi của đề tài đề xuất (đường màu đỏ)

Quỹ đạo mong muốn của khâu chấp hành cuối của tay máy robot song song phẳng là đường tròn có phương trình như sau:

$$\begin{cases} x = 0.49 + 0.03\cos(\frac{\pi t}{3}) \\ y = 0.37 + 0.03\sin(\frac{\pi t}{3}) \\ \phi = \pi/2 \end{cases} \quad (4.6)$$

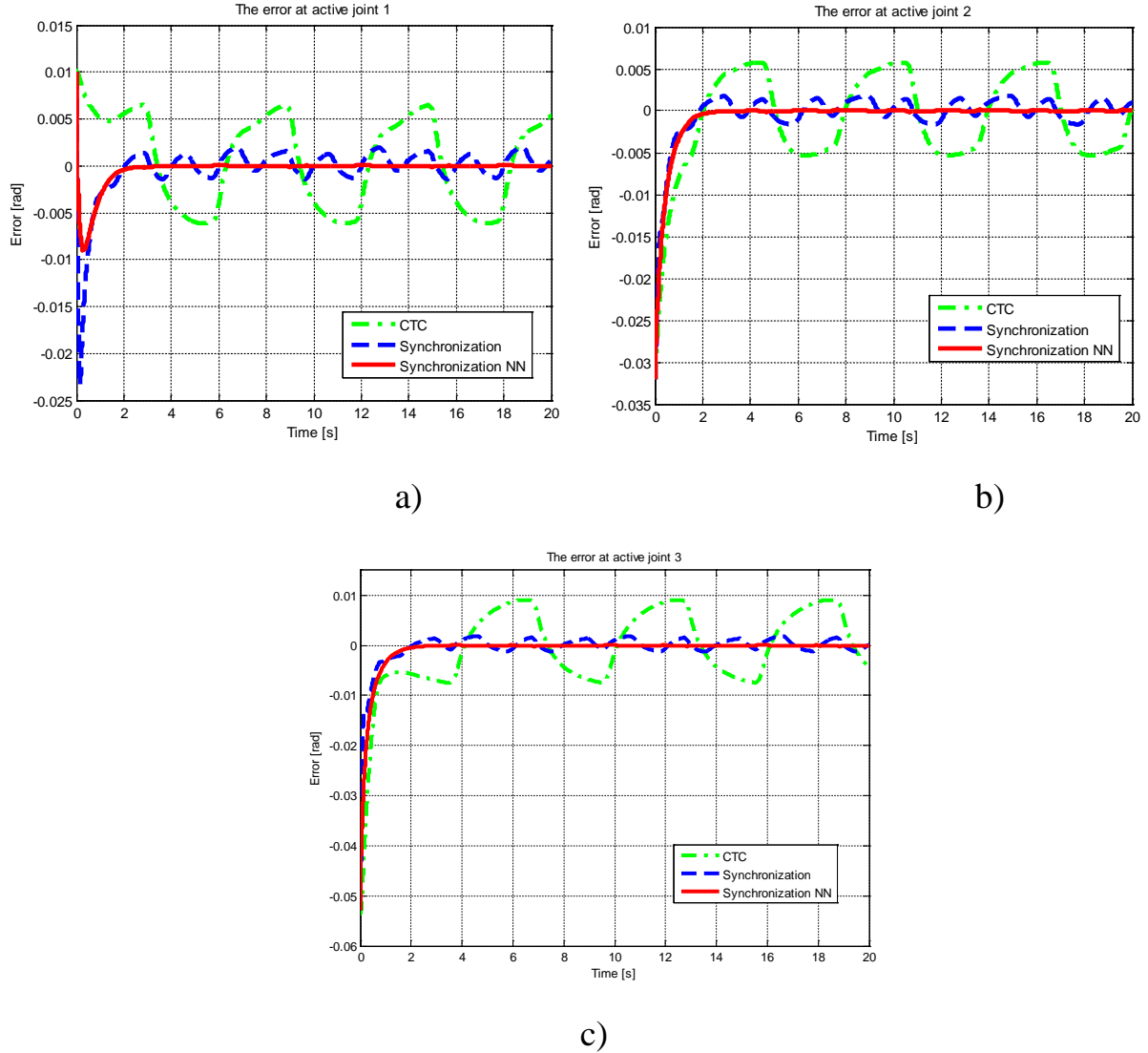
Các lực ma sát tác dụng lên các khớp chủ động của tay máy robot được mô phỏng theo công thức:

$$F_{ai} = 0.5\text{sign}(\dot{q}_{ai}) + 0.4\dot{q}_{ai}, i = 1,2,3 \quad (4.7)$$

Kết quả điều khiển quỹ đạo của khâu chấp hành cuối của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do bám theo được tròn được thể hiện như trên Hình 4.6. Khâu chấp hành cuối được điều khiển để bám theo đường tròn lặp lại nhiều lần trong vòng 20 giây. Điểm khởi đầu của khâu chấp hành cuối nằm bên ngoài đường tròn và có tọa độ là  $A_0(0.528, 0.368)$ . Từ Hình 4.6, chúng ta có thể thấy rằng kết quả điều khiển của bộ điều khiển tính mô-men truyền thống (đường màu xanh lá cây) không bám sát đường quỹ đạo mong muốn bằng 2 trường hợp còn lại. Kết quả điều khiển bám quỹ đạo của các trường hợp sử dụng bộ điều khiển đồng bộ tính mô-men và bộ điều khiển tính mô-men thích nghi mang lại tốt hơn. Nếu tập trung phân tích kỹ hơn giai đoạn ban đầu ở lân cận điểm  $A_0$ , chúng ta thấy rằng bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất có tốc độ hội tụ tốt nhất trong 3 bộ điều khiển.

Hình 4.7 là kết quả điều khiển bám của các khớp chủ động 1, 2 và 3 của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động. Kết quả cho thấy các sai số tại các khớp chủ động trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển đồng bộ tính mô-men nhỏ hơn nhiều so với trường hợp sử dụng bộ điều khiển tính mô-men truyền thống. Đặc biệt, bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất mang lại sai số nhỏ nhất trong cả 3 trường hợp. Sai số của trường hợp sử

dụng bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất rất nhỏ, gần như bằng không.

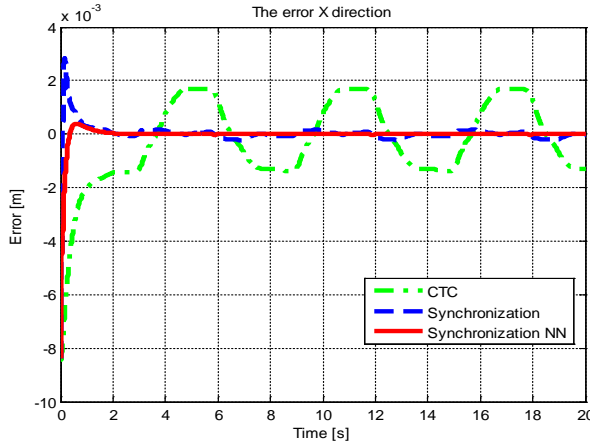


**Hình 4.7.** So sánh sai số bám quỹ đạo của các khớp chủ động:

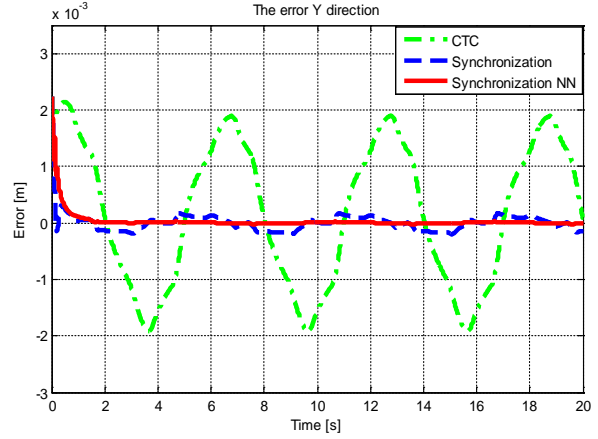
a) Sai số của khớp chủ động 1; b) Sai số của khớp chủ động 2 và c) Sai số của khớp chủ động 3

Sai số của khâu chấp hành cuối theo trục X, theo trục Y và sai số góc quay của khâu chấp hành cuối được biểu diễn như trên Hình 4.8. Từ kết quả trên hình cho thấy, sai số trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển đồng bộ tính mô-men rất nhỏ so với sai số trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển tính mô-men truyền thống. Đặc biệt, so sánh giữa 3 trường hợp của 3 bộ điều khiển, thì bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất mang lại kết quả sai số nhỏ nhất. Như vậy, chúng

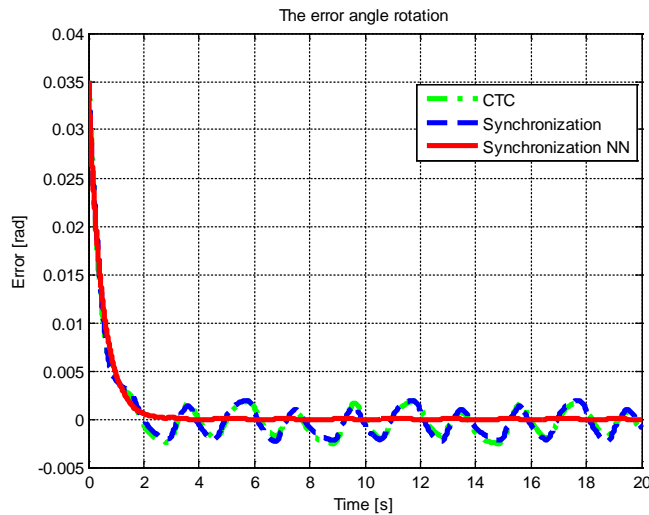
ta có thể kết luận được rằng bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mà đề tài đề xuất mang lại hiệu quả tốt cho việc điều khiển tay máy robot song song phẳng, và bù được các thành phần bất định cũng như nhiễu loạn từ bên ngoài.



a)



b)



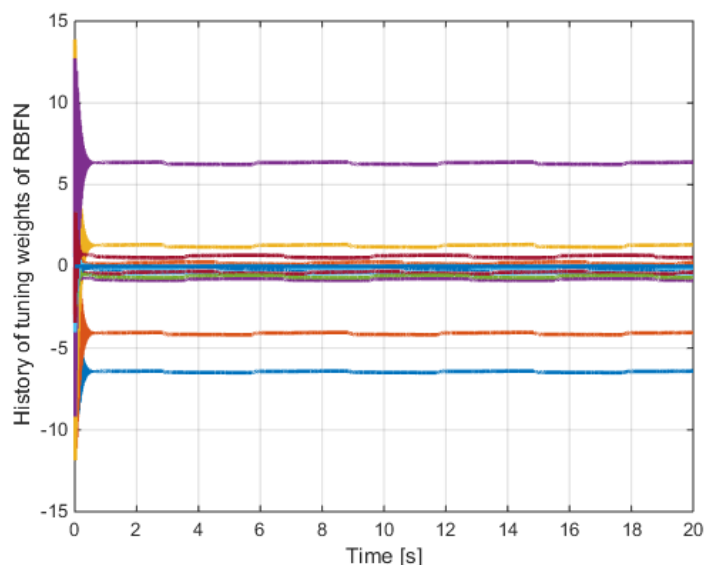
c)

**Hình 4.8.** So sánh sai số bám quỹ đạo của khâu chấp hành cuối

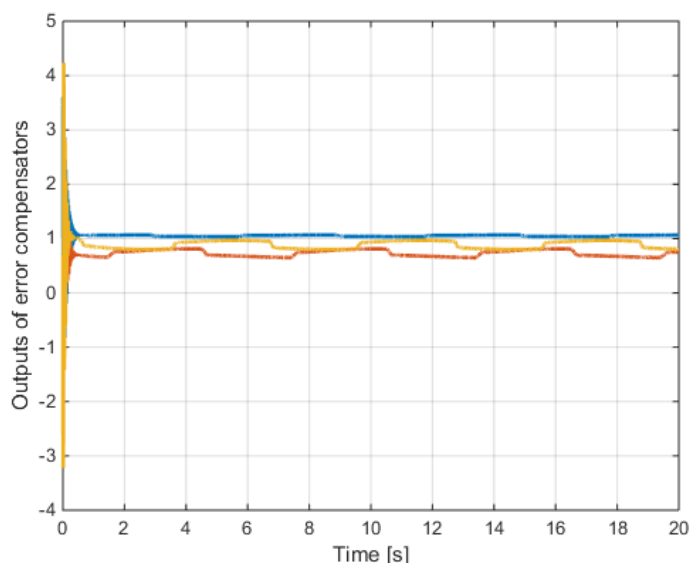
a) Error in the X-direction; b) Error in the Y-direction; and c) Error of rotary angle

Trên Hình 4.9a là đồ thị của kết quả tự động chỉnh định online các tham số của mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm trong quá trình robot hoạt động. Giá trị ban đầu của các ma trận tham số là  $W_i(0) = 0.01 \times I$ . Có thể thấy rằng các tham số

hội tụ và bị chặn trên. Hình 4.9b cũng biểu diễn kết quả tự động chỉnh định online của các bộ bù sai số. Kết quả cũng cho thấy các tín hiệu đầu ra của các bộ bù sai số hội tụ và bị chặn trên. Các giá trị của hệ số học là lần lượt là  $\mu_i = 0.0015$ , và  $\eta_i = 0.01$  ( $i = 1,2,3$ ).



a)



b)

**Hình 4.9.** a) Kết quả chỉnh định online các tham số của mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm  
b) Kết quả chỉnh định online các tham số của các bộ bù sai số



Để thấy rõ hơn hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, sai số trung bình bình phương cực tiểu (RMSE - Root Mean Square Error) được đưa ra để tính toán theo công thức:

$$E_X = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_X^2(i)} \quad (4.8)$$

$$E_Y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_Y^2(i)} \quad (4.9)$$

$$E_\phi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_\phi^2(i)} \quad (4.10)$$

Với  $E$  là sai số theo trục x và y;  $E_\phi$  là sai số của góc quay của khâu chấp hành cuối;  $e_x(j)$ ,  $e_y(j)$  là sai số theo trục x và trục y;  $e_\phi(j)$  là sai số góc quay của khâu chấp hành cuối.

Sai số tương đối của điều khiển bám quỹ đạo được tính theo công thức sau:

$$\partial E_X = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_X^2(i)}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X(i)|} \quad (4.11)$$

$$\partial E_Y = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_Y^2(i)}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y(i)|} \quad (4.12)$$

$$\partial E_\phi = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_\phi^2(i)}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Phi(i)|} \quad (4.13)$$

Kết quả so sánh các giá trị trung bình bình phương các sai số tuyệt đối được tổng hợp trong Bảng 4.3. Và kết quả so sánh các giá trị trung bình của các sai số tương đối được tổng hợp trong Bảng 4.4. Kết quả cho thấy bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mang lại sai số nhỏ nhất trong 3 trường hợp và sai số tương đối được đảm bảo dưới 3%.

**Bảng 4.3.** Kết quả so sánh giá trị trung bình bình phương các sai số tuyệt đối

Bộ điều khiển	$E_X$	$E_Y$	$E_\Phi$
Bộ điều khiển tính mô-men truyền thống	0.0016	0.0013	0.0041
Bộ điều khiển tính mô-men đồng bộ	4.6538e-04	1.6779e-04	0.0041

Bộ điều khiển đồng bộ thích nghi	4.2918e-04	1.6220e-04	0.0039
-------------------------------------	------------	------------	--------

**Bảng 4.4.** Kết quả so sánh giá trị trung bình các sai số tương đối

<b>Bộ điều khiển</b>	<b><math>\partial E_x</math></b>	<b><math>\partial E_y</math></b>	<b><math>\partial E_\phi</math></b>
Bộ điều khiển tính mô- men truyền thống	0.3236%	0.3484%	1.5544%
Bộ điều khiển tính mô- men đồng bộ	0.0947%	0.0451%	1.5582%
Bộ điều khiển đồng bộ thích nghi	0.0874%	0.0411%	1.4877%

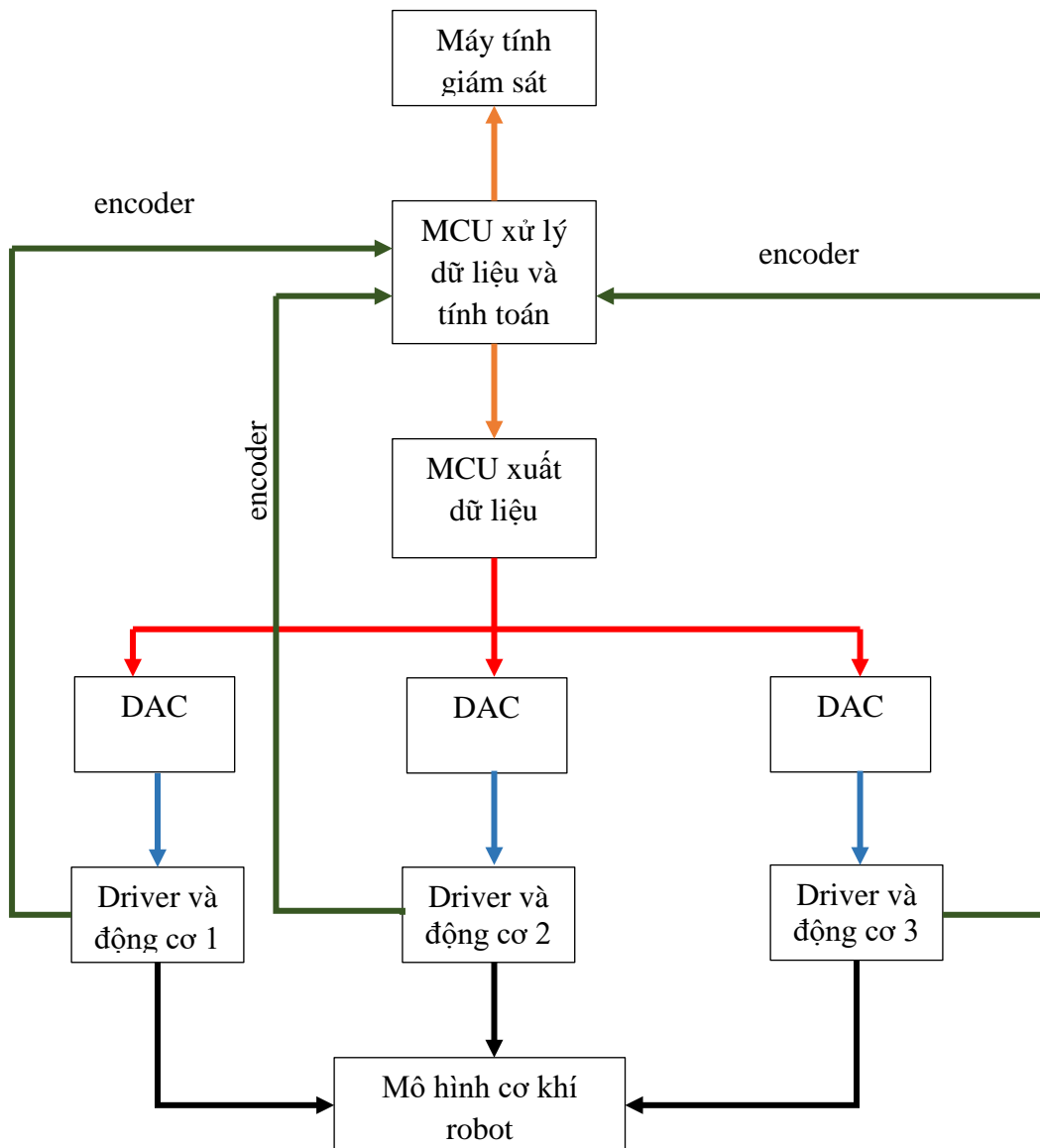
## CHƯƠNG 5

### THỬ NGHIỆM CHẾ TẠO MÔ HÌNH PHẦN CỨNG CỦA ROBOT

#### 5.1. MÔ TẢ MÔ HÌNH PHẦN CỨNG

##### 5.1.1. Sơ đồ tổng quát của mô hình.

Dưới đây là sơ đồ cấu trúc phần cứng của tay máy robot song song phẳng mà đề tài thực hiện chế tạo thử nghiệm.



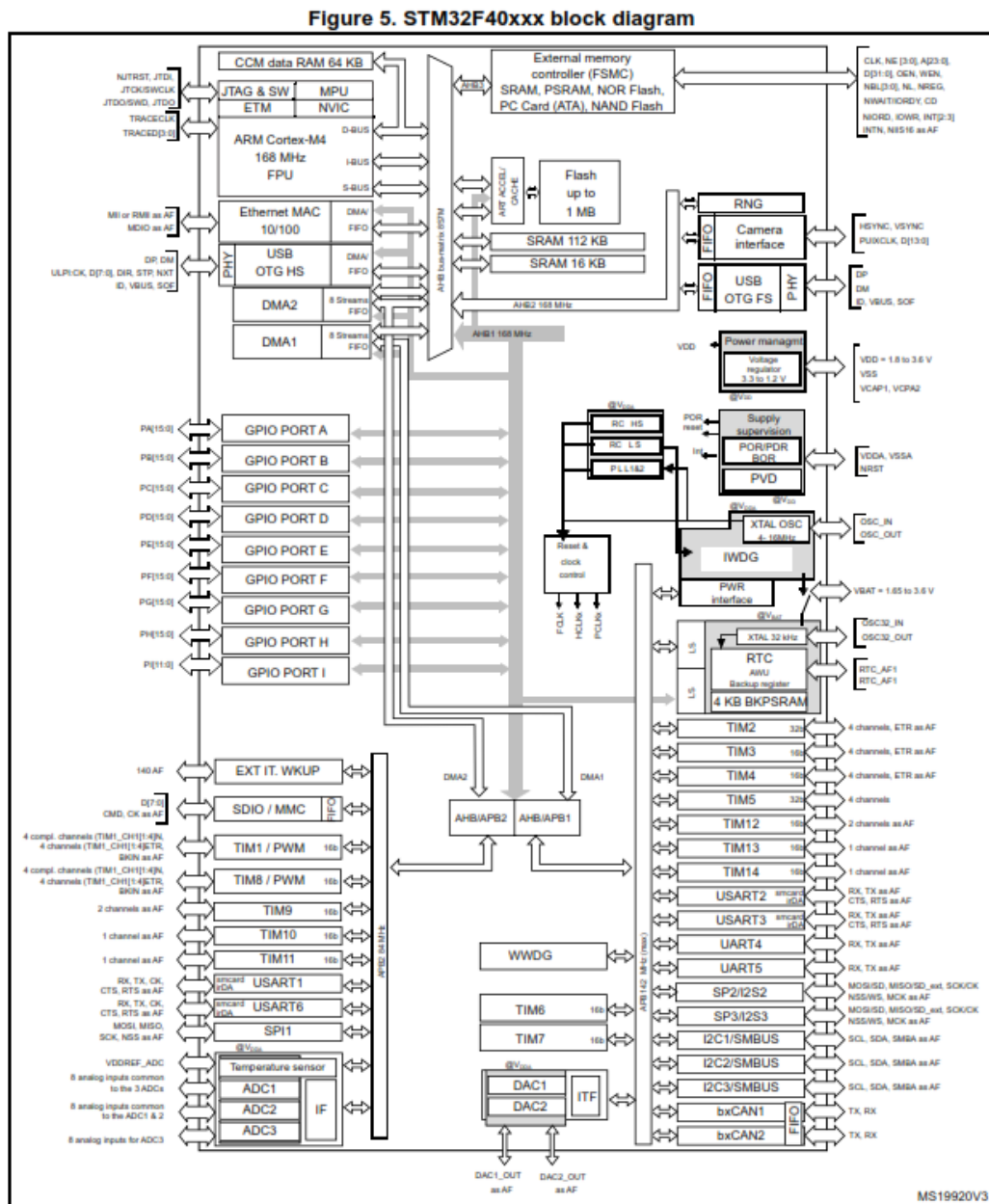
*Hình 5.1. Sơ đồ tổng quát của mô hình phần cứng robot*

### 5.1.2. Máy tính giám sát

Máy tính được sử dụng để nhận giữ liệu gửi lên từ MCU STM32F407 thông qua phương thức giao tiếp USART. Các giá trị nhận là thông số  $X$  và  $\theta_a$ . Sau khi đã nhận dữ liệu, máy tính tiến hành xử lý và xuất dữ liệu để so sánh kết quả và đánh giá ra màn hình dưới dạng đồ thị.

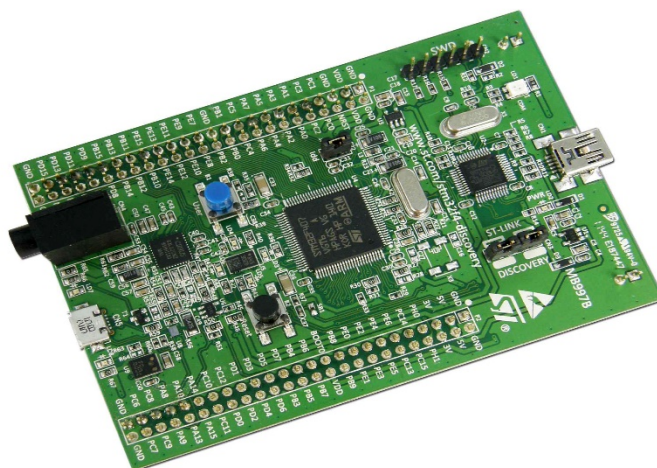
### 5.1.3. MCU xử lý và tính toán dữ liệu

#### a) Giới thiệu về STM32F4 discovery



**Hình 5.2. Sơ đồ cấu trúc của KIT STM32F4**

Để xử lý khối lượng tính toán lớn, đặc biệt phải tính toán các ma trận và thời gian xử lý phải ngắn, nên MCU phải có tốc độ xử lý cao và có bộ nhớ lớn. Để đáp ứng được các yêu cầu này, KIT STM32F4 đã được chọn để thực hiện các thuật toán của đề tài.



**Hình 5.3.** Kit STM32F4 discovery

STM32F4 discovery thuộc họ STM32F4 do hãng ST sản xuất. Kit sử dụng chip ARM 32 bit Cortex –M4. Đây là dòng chip thế hệ mới, thiết lập các tiêu chuẩn mới về hiệu suất, chi phí, ứng dụng cho các thiết bị cần tiêu thụ năng lượng thấp và đáp ứng yêu cầu thời gian thực khắt khe. Khả năng tính toán số học mạnh vì hỗ trợ xử lý phép toán 32 bit. Có nhiều bus truyền dữ liệu, khiến tốc độ truy nhập nhanh. Đặc biệt cơ chế DMA (Direct Memory Access) cho phép truyền trực tiếp dữ liệu từ RAM ra các I/O mà không cần qua CPU. Dưới đây là thông số của kit.

**Bảng 5.1.** Thông số của kit STM32F4 discovery

Thông số	Đặc điểm
Điện áp hoạt động	1.8 V-3.6V
Tần số hoạt động cao nhất	168 MHz
Số lượng chân	84 chân
Port	Bao gồm các port A, B,C,D,E. Trong mỗi port có 16 kênh
ADC	3 bộ ADC 12 bit 2,4 MSPS

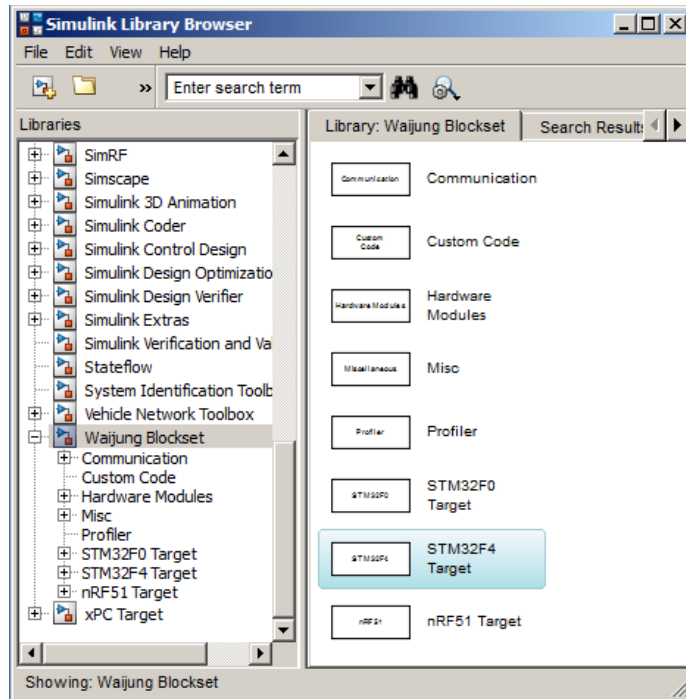
	24 bộ ADC 12 bit 7,2 MSPS
DAC	2 bộ DAC 12 bit
Timer	12 timer 16 bit 2 timer 32 bit
Các khối truyền thông	3 bộ I2C, 3 bộ SPI, 4 bộ USART, 2 bộ UART 2 bộ CAN Hỗ trợ giao tiếp thẻ nhớ
Kết nối nâng cao	Hỗ trợ chuẩn USB 2.0 Chuẩn Ethernet

#### *b) Chương trình điều khiển*

Chương trình điều khiển tay máy robot được viết bằng cách sử dụng gói công cụ Waijung Blockset. Waijung Blockset được phát triển để viết chương trình cho họ STM32F4 trên phần mềm Matlab-Simulink. Waijung Blockset cung cấp đầy đủ các giao tiếp ngoại vi, các kiểu truyền thông, khối timer. Người dùng không cần phải tốn thời gian để tìm hiểu nhiều cách thức lập trình cũng như khai báo phần cứng cho kit. Chương trình điều khiển được viết trong các khối matlab function và sau đó được biên dịch và nạp vào kit. Các khối trong bộ công cụ Simulink cũng sử dụng được trong việc viết chương trình cho STM32F4.

##### **5.1.4. MCU xuất dữ liệu**

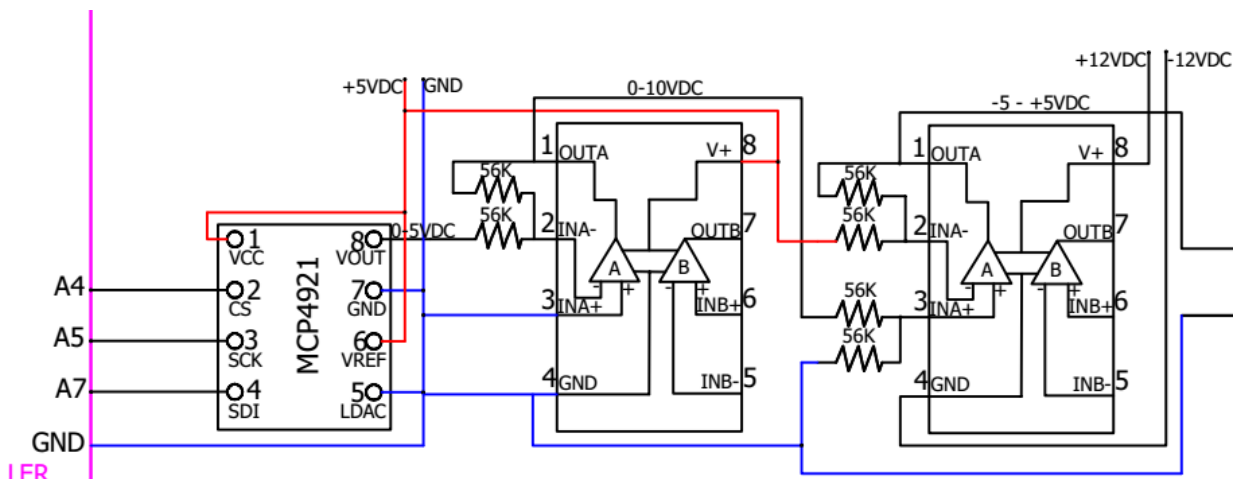
Sau khi tính toán ra các giá trị mô men để đặt vào các bộ DAC thông qua giao tiếp SPI. Giao tiếp ngoại vi nối tiếp (SPI) là một bus giao diện thường được sử dụng để gửi dữ liệu giữa các bộ vi điều khiển và các thiết bị ngoại vi nhỏ như thanh ghi thay đổi, cảm biến và thẻ SD. Nó sử dụng đồng hồ riêng biệt và các dòng dữ liệu, cùng với một dòng chọn để chọn thiết bị bạn muốn giao tiếp. Giá trị xuất ra cho bộ DAC(12bit) nằm trong khoảng từ 0 đến 4093. Tương ứng với giá trị điện áp từ -5 Volt đến +5 Volt để đặt vào driver ở chế độ điều khiển mô men. Để driver điều khiển mô men của động cơ theo mô men yêu cầu từ bộ DAC.



**Hình 5.4.** Bộ công cụ lập trình Waijung Blockset trong thư viện Simulink

### 5.1.5. Bộ DAC

Bộ DAC có chức năng chuyển đổi các giá trị số của momen thành điện áp điều khiển để đưa vào bộ chân Tref của driver nhằm mục đích điều khiển momen của động cơ.



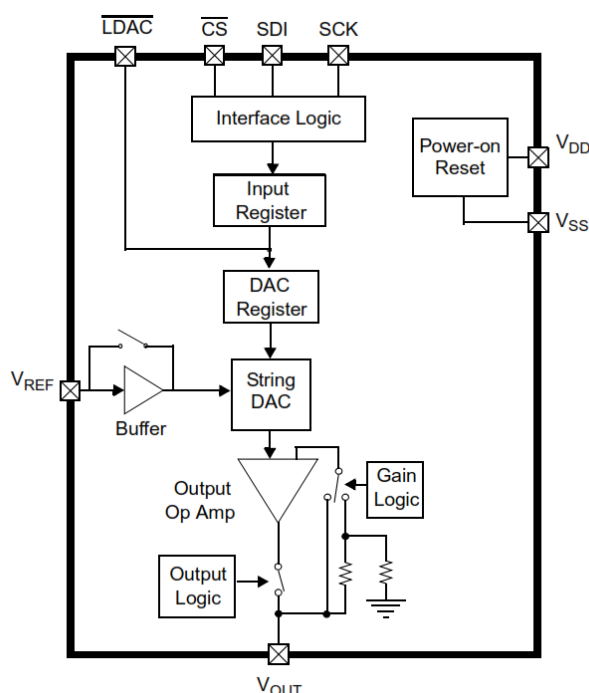
**Hình 5.6.** Sơ đồ nguyên lý của mạch chuyển đổi DAC

Mạch DAC gồm 2 bộ phận chính là IC MCP4921 và IC LM358. Nguyên lý hoạt động của mạch như sau: IC chuyển đổi D/A thực hiện chuyển đổi giá trị số

thành giá trị điện áp từ 0 đến VREF. Sau đó, giá trị điện áp đi qua một mạch trừ vi sai để chuyển điện áp thành điện áp nằm trong khoảng từ -VREF/2 đến VREF/2.

*a) IC chuyển đổi số sang analog MCP4921*

MCP4921 là một DAC có chức năng chuyển đổi giá trị số thành giá trị điện áp tương ứng. Đây là loại DAC có độ chính xác cao, giá trị nhiễu nhỏ phù hợp với các ứng dụng công nghiệp.



**Hình 5.7.** Sơ đồ cấu trúc MCP4921

Dưới đây là bảng thông số và bảng chức năng chân của IC.

**Bảng 5.2.** Thông số kỹ thuật của MCP4921

DAC	12 bit
Giao tiếp	SPI
Điện áp hoạt động VDD	2.7 V- 5.5V
Điện áp tham chiếu	0 –VDD sử dụng điện áp bên ngoài
Số chân	8 chân



**Bảng 5.3. Chức năng các chân MCP4921**

STT	Tên	Chức năng
1	VDD	Cấp nguồn cho IC
2	CS	Chân chọn chip
3	SCK	Chân nhận xung clock
4	SDI	Chân nhận dữ liệu
5	LDAC	Cho phép chuyển đổi khi LDAC nối đất
6	VREF	Chân điện áp tham chiếu
7	VSS	Chân đất
8	VOUT	Chân xuất điện áp chuyển đổi

MCP4921 sử dụng chuẩn truyền thông SPI để nhận dữ liệu. Muốn MCP4921 hoạt động, người dùng cần ghi 16 bit dữ liệu lên MCP4921 theo cấu trúc như sau:

Upper Half:							
W-x	W-x	W-x	W-0	W-x	W-x	W-x	W-x
A/B	BUF	GA	SHDN	D11	D10	D9	D8
bit 15				bit 8			

Lower Half:							
W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
bit 7				bit 0			

**Hình 5.8. Cấu trúc dữ liệu cần truyền của MCP4912**

Bảng dưới đây giải thích chức năng của các bit:

**Bảng 5.4. Chức năng các bit dữ liệu của MCP4921**

Bit	Chức năng	Giá trị
A/B	Chọn bộ DAC	1 : Bộ DACA 0 : Bộ DACB
BUF	Điều khiển bộ đệm điện áp tham chiếu VREF	1: sử dụng 0: không sử dụng
GA	Hệ số nhân đôi	1: Sử dụng hệ số nhân đôi 0: không sử dụng hệ số nhân

SHDN	Điều khiển điện áp ngõ ra	1: Không cho phép 0: Cho phép xuất điện áp
D11-D0	Các giá trị điện áp cần chuyển đổi	

Sau khi dữ liệu đã được nhận MCP 4921 thực hiện chuyển đổi D/A theo công thức sau:

$$V_{out} = \frac{V_{REF} \times D_n}{2^n} G \quad (5.2)$$

*b) IC khuếch đại thuật toán LM358*

LM358 do hãng Motorola sản xuất. Đây là một loại IC khuếch đại thuật toán rất phổ biến tại Việt Nam, được sử dụng nhiều trong các ứng dụng dân dụng. Nó là loại IC 8 chân gồm 2 bộ khuếch đại thuật toán. Điện áp nguồn cấp từ 3 V đến 32V đối với nguồn đơn hoặc  $\pm 1.5V$  đến  $\pm 16V$  đối với nguồn đôi.

**Bảng 5.5. Chức năng của các chân LM358**

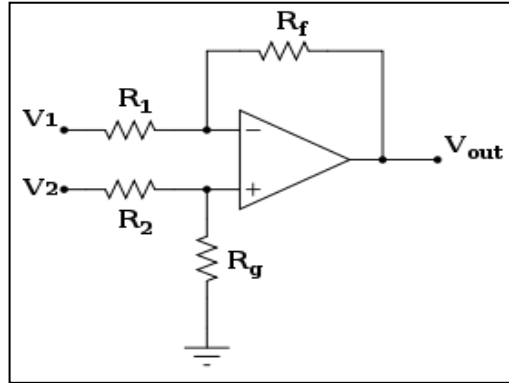
STT	Tên	Chức năng
1	OUTA	Xuất giá trị điện áp của kênh A
2	-INA	Đầu vào đảo của kênh A
3	+INA	Đầu vào không đảo kênh A
4	V-/GND	Chân đất hoặc nguồn âm
5	+INB	Đầu vào không đảo kênh B
6	-INB	Đầu vào đảo kênh B
7	OUTB	Đầu ra điện áp kênh B

Trong đồ án này LM358 được sử dụng để làm mạch trừ vi sai theo công thức tính toán như sau:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \left(\frac{R_g}{R_g + R_2}\right) V_2 - \frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (5.3)$$

Lựa chọn các thông số điện trở sao cho  $R_f = R_g = R_1 = R_2$  khi đó phương trình (5.3) trở thành:

$$V_o = V_2 - V_1 \quad (5.4)$$



**Hình 5.9.** Sơ đồ nguyên lý mạch trừ vi sai

#### 5.1.6. Động cơ và driver

##### a) Động cơ

Là thiết bị truyền động chính cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do qua các khớp chủ động. Trong đề tài sử dụng động cơ Servo của hãng Omron và có driver SDGA đi kèm. Các đặc điểm, thông số của động cơ được trình bày chi tiết như sau:



**Hình 5.10.** Động cơ servo Omron và driver SDGA

**Bảng 5.6. Thông số của động cơ**

STT	Thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Tên động cơ	Omron R88M-UE1100VS1	
2	Công suất định mức	100	W
3	Momen định mức	0.318	N.m
4	Tốc độ định mức	3000	v/p
5	Dòng điện định mức	0.87	A
6	Tốc độ cực đại	4500	v/p
7	Momen cực đại	0.96	N.m

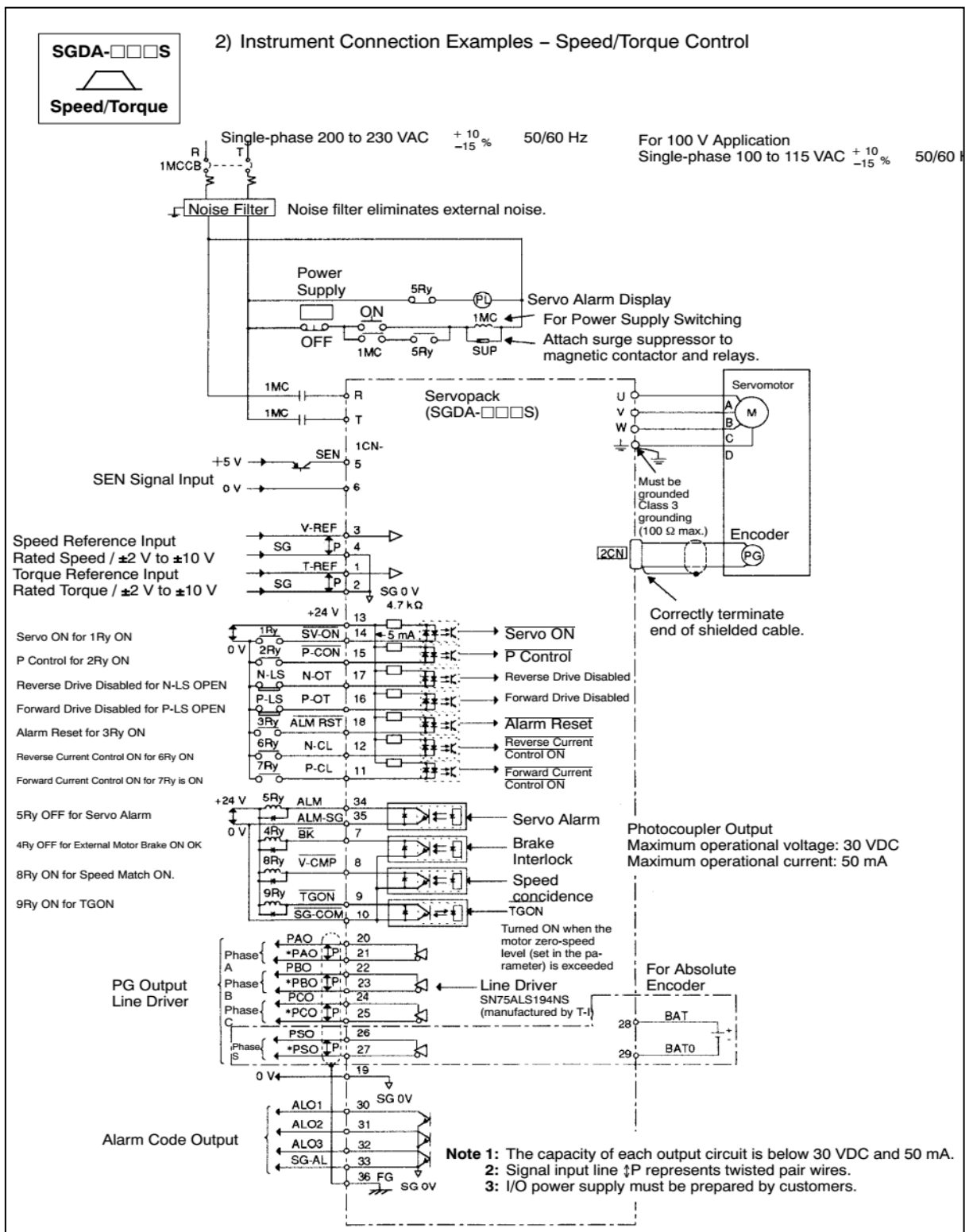
**b) Driver của động cơ**

Mỗi loại động cơ thường đi kèm với một driver được ghép thành bộ với nhau và được gọi là servopack. Driver nhận tín hiệu điều khiển từ DAC qua chân CN1 và tín hiệu phản hồi từ động cơ về để thực hiện tính toán điều khiển động cơ theo mong muốn. Việc lựa chọn driver dựa trên thuật toán điều khiển của mô hình. Yêu cầu driver phải có chức năng điều khiển được momen và phải giao tiếp với máy tính và MCU.

Dưới đây là bảng thông số của driver:

**Bảng 5.7. Thông số của driver SDGA**

STT	Tên thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Tên của driver	SGDA-02AS	
2	Công suất định mức	100	W
3	Điện áp ngõ vào	220	V
4	Điện áp ngõ ra	0-220	V
5	Dòng điện định mức ngõ vào	2.5	A
6	Dòng điện định mức ngõ ra	1.25	A
7	Tần số	50-60	Hz



Hình 5.11. Sơ đồ nối dây của driver SDGA

Các kênh chức năng chính của driver:

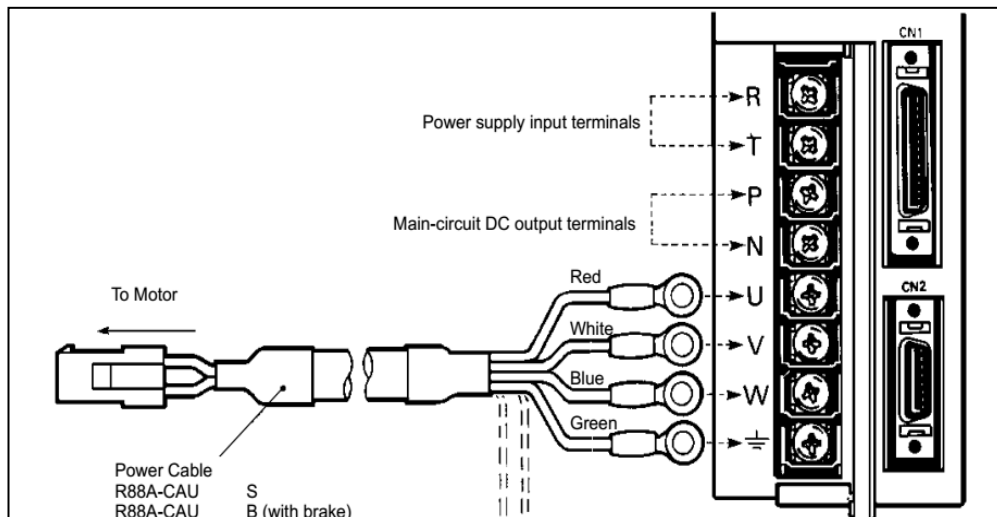
Kênh CN1 thực hiện chức năng chủ yếu là điều khiển. Kết nối giữa bộ DAC để nhận các giá trị đặt của momen, tốc độ và nguồn 24V ON-OFF và quy định chiều âm dương cho chiều quay động cơ.

Kênh CN2 là kênh tiếp nhận tín hiệu encoder từ động cơ đưa về driver. Từ chân này driver có thể giám sát và điều khiển động cơ một cách liên tục .

Kênh Operator là kênh cho phép kết nối servopack với máy tính bằng phần mềm SIGMAWIN. Từ phần mềm này, ta có thể cài đặt các thông số, giám sát hoạt động của driver một cách trực tiếp và dễ dàng.

*c) Sơ đồ nối dây của động cơ và driver.*

Để làm việc được với nhau thì động cơ và driver phải được nối theo nhất định, phải đảm bảo các yêu cầu về điện áp, dòng điện cũng như là thứ tự pha U, V, W của nguồn cấp cho động cơ.



**Hình 5.12.** Sơ đồ đấu nối giữa động cơ và driver

**Bảng 5.8.** Tên và chức năng các chân đấu nối giữa động cơ và driver

Tên chân	Chức năng
R,T	Chân nguồn cung cấp điện xoay chiều cho driver (170 đến 230V) tần số 50 đến 60Hz
P,N	DC ngõ ra để kết nối với các thiết bị khác( không dùng).
U,V,W	Ngõ ra kết nối với động cơ
GND	Chân nối đất, yêu cầu nối đất cấp 2 ( $R < 100 \Omega$ )

**Bảng 5.9.** Chức năng chân của kênh CN2

Tên chân	Ký hiệu	Giải thích
1,2,3	E0V	0V encoder
4,5,6	E5V	+5V nguồn cấp cho encoder
7	DIR	Định hướng chiều quay
8,9,10,11,12,13	NC	Không dùng
14	S+	Encoder pha S+
15	S-	Encoder pha S-
16	A+	Encoder pha A+
17	A-	Encoder pha A-
18	B+	Encoder pha B+
19	B-	Encoder pha B-
20	FG	Nối đất lớp giáp bảo vệ

*d) Kết nối giữa driver với MCU*

Driver có thể kết nối với các thiết bị điều khiển bên ngoài qua kênh CN1. Kênh này có 36 chân và phụ thuộc vào yêu cầu sử dụng và điều khiển để người sử dụng chọn các chân cần thiết để đấu nối với mạch điều khiển.

Lúc này, driver nhận tín hiệu điều khiển momen từ chân số 1 và chuyển đổi thành momen điều khiển thông qua công thức:

$$\tau = \frac{0.318 T_{ref}}{2.7} \quad (\text{N.m}) \quad (5.6)$$

Với yêu cầu điều khiển momen có đảo chiều thì sơ đồ kết nối được chọn như bảng 5.10.

**Bảng 5.10.** Tên và chức năng các chân sử dụng ở kênh CN1

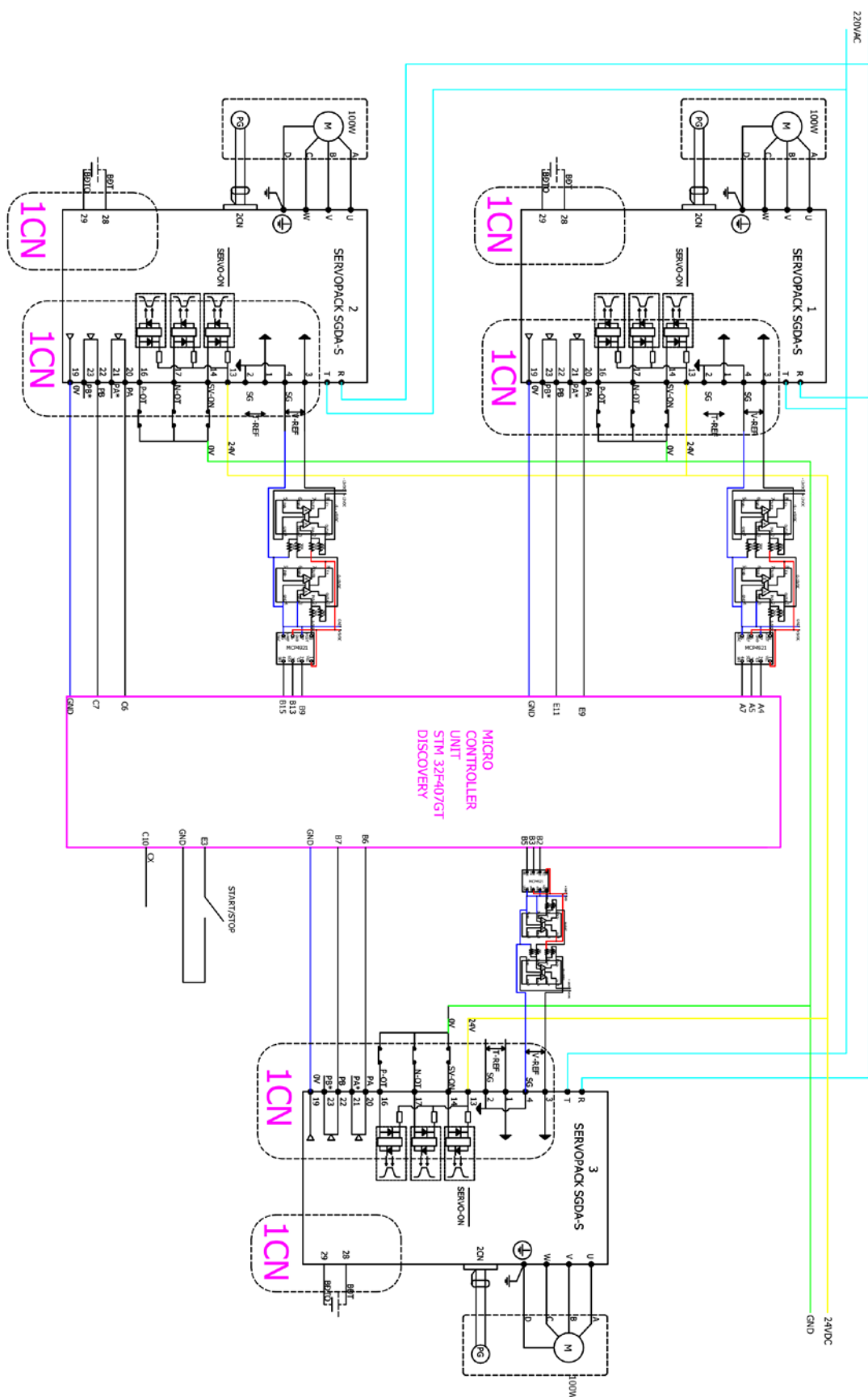
Tên chân	Chức năng
1	Điện áp điều khiển momen Tref
2,4	0V của điện áp điều khiển
13	Điều khiển ON, OFF động cơ (24V)
14	0V nguồn để ON, OFF động cơ
16	Nối vào 0V để cho phép động cơ quay thuận
17	Nối vào 0V để cho phép động cơ quay nghịch
19	Chân GND của encoder
20	Chân encoder pha A+
22	Chân encoder pha B+

*e) Kết nối driver với máy tính*

Việc kết nối với máy tính là để giám sát hoặc cài đặt các thông số cho servopack. Thông qua máy tính người sử dụng có thể nhận biết các trạng thái hoạt động cũng như các thông số về tốc độ, momen, hãm hay các mã lỗi của driver. Để kết nối với máy tính thì cần phải sử dụng cáp chuyển đổi và phần mềm SIGMAWIN tương ứng với loại servopack.



### 5.1.7. Sơ đồ kết nối của cả hệ thống



Hình 5.13. Sơ đồ kết nối của cả hệ thống

### ***5.1.8. Chế tạo phần cơ khí***

Bộ phận cuối cùng của robot đó chính là các cánh tay và cơ cấu chấp hành ở giữa. Các cánh tay có cùng chiều dài và kích thước cũng như trọng lượng để dễ dàng trong việc tính toán và vận hành. Để truyền động cho cơ cấu chấp hành ở giữa thì mô hình sử dụng các ổ bi có trục quay cố định cho các khớp bị động còn đối với khớp chủ động thì nối trực tiếp cánh tay vào trục hộp số.



***Hình 5.14. Mô hình thực tế của robot***

Dưới đây là thông số của mô hình cơ khí:

**Bảng 5.11.** Thông số cánh tay robot

STT	Tên chi tiết	Kích thước			
		Chiều dài (mm)	Chiều rộng (mm)	Chiều cao (mm)	Đường kính (mm)
1	Cánh tay $L_1$	220	30	10	
2	Cánh tay $L_2$	220	30	30	
3	Cơ cấu chấp hành			5	205
4	Bệ đỡ	600	600	350	

Vì mô hình chỉ yêu cầu điều khiển về mặt momen với tốc độ nhỏ nên trong mô hình phải dùng thêm hộp số.



**Hình 5.16.** Hộp số GPL052

**Bảng 5.12.** Thông số kỹ thuật của hộp số

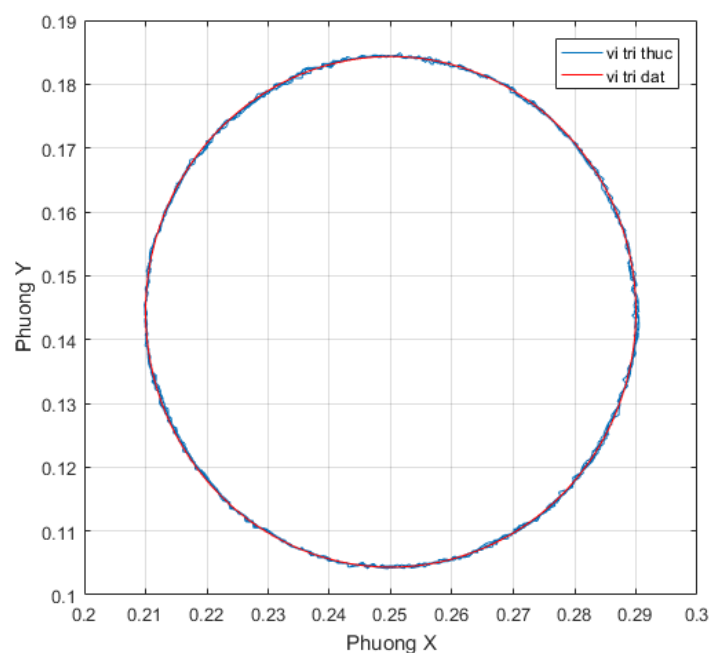
STT	Tên thông số	Giá trị	Đơn vị
1	Tên hộp số	GPL052-Type S	
2	Momen định mức	15	N.m

3	Tỉ lệ truyền	25	
4	Hiệu suất truyền	85	%
5	Tốc độ tối đa	5000	Vòng/phút
6	Khoảng chết	< 12	Arc
7	Nhiệt độ làm việc	-25 đến 90	$^{\circ}C$
8	Trọng lượng	600	g

## 5.2. CÁC KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

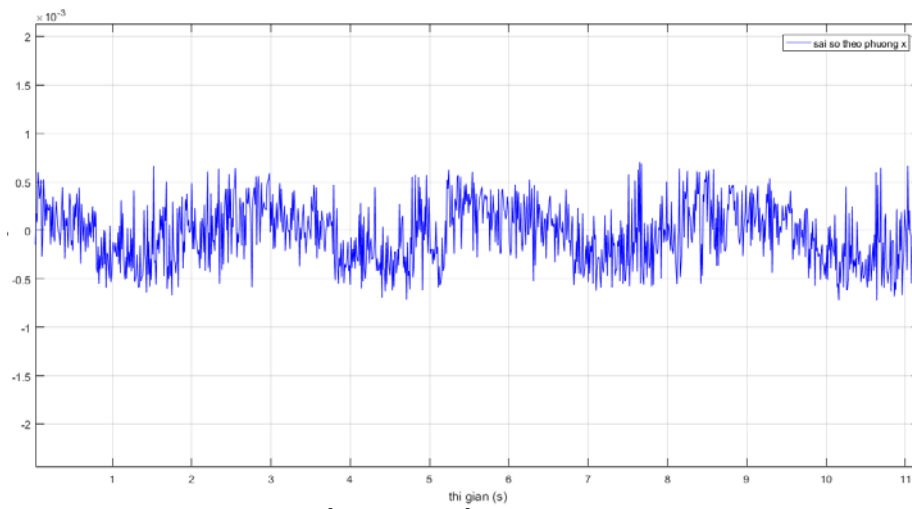
Sau khi chế tạo thành công mô hình phần cứng, nhóm thực hiện đề tài đã thực hiện điều khiển hoạt động robot. Bộ điều khiển sử dụng phương pháp điều khiển đồng bộ tính mô-men. Sau đó, các dữ liệu được thu thập về máy tính để vẽ các đồ thị phân tích kết quả. Các kết quả thực nghiệm thu được như sau:

Trên Hình 5.17 là kết quả đồ thị điều khiển khâu chấp hành cuối của tay máy robot bám theo quỹ đạo đường tròn. Kết quả cho thấy khâu chấp hành cuối đã bám gần như sát với quỹ đạo đường tròn mong muốn. Các sai số sẽ được thể hiện trong các đồ thị tiếp theo.

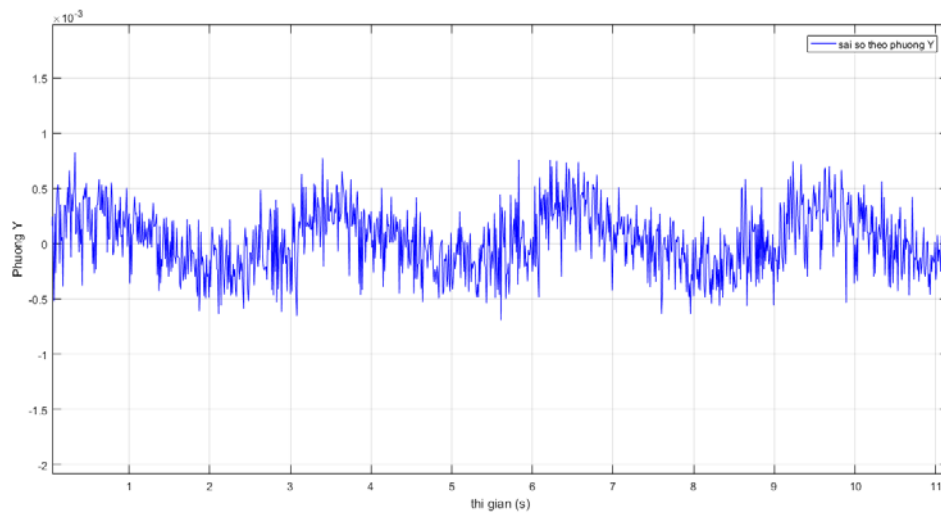


**Hình 5.17.** Đồ thị kết quả thực nghiệm khâu chấp hành cuối bám theo quỹ đạo

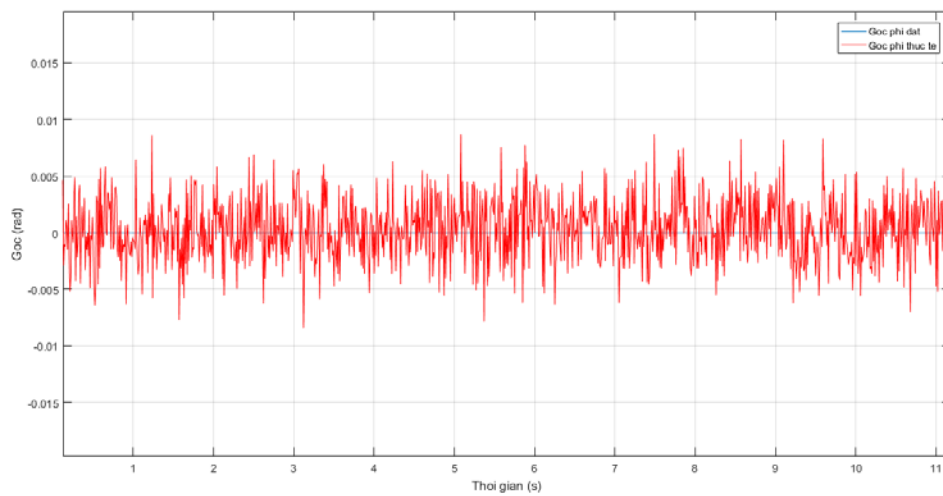
đường tròn



**Hình 5.18.** Đồ thị sai số của mô hình theo phương X

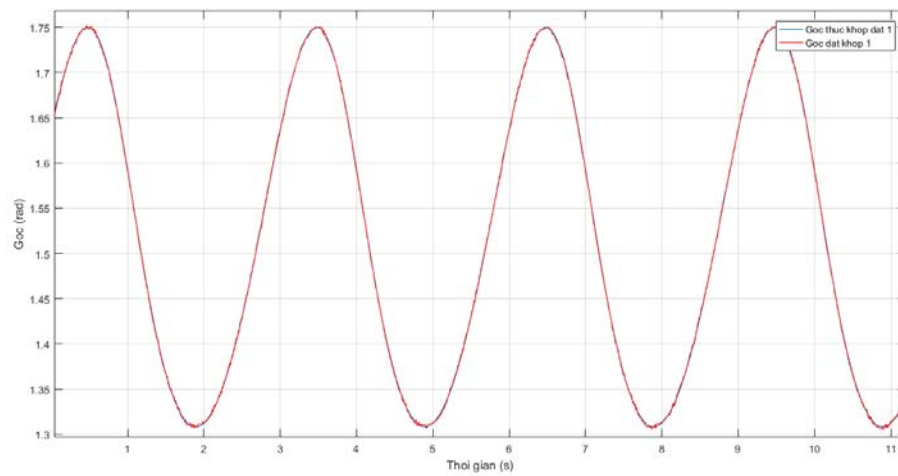


**Hình 5.19.** Đồ thị sai số của mô hình theo phương Y

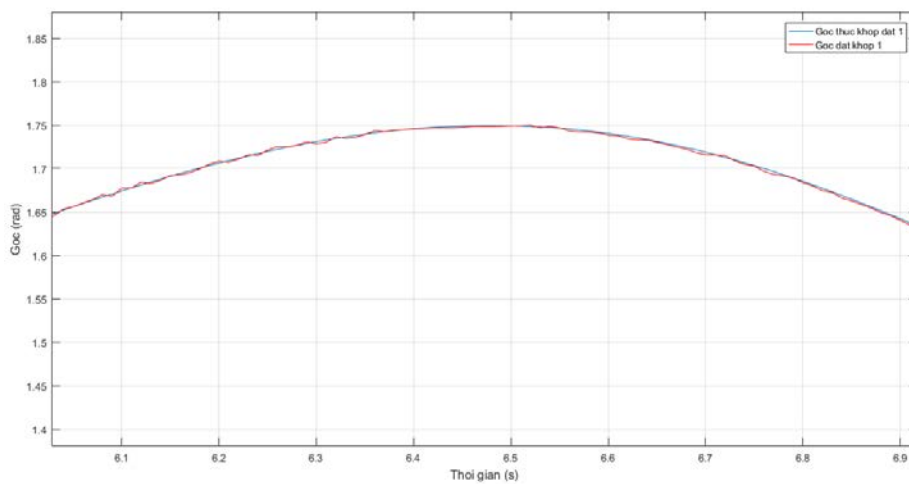


**Hình 5.20.** Đồ thị sai số góc quay của khâu chấp hành cuối

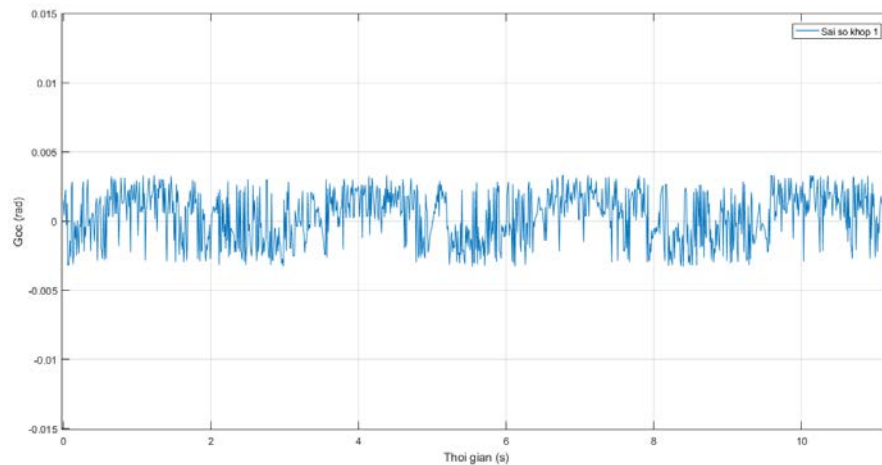
Kết quả cho thấy giá trị thực của các khớp chủ động bám tương đối tốt với giá trị góc chủ động yêu cầu. Tuy nhiên, giá trị các góc chủ động tại các đỉnh của đồ thị thường bị nhiễu một ít.



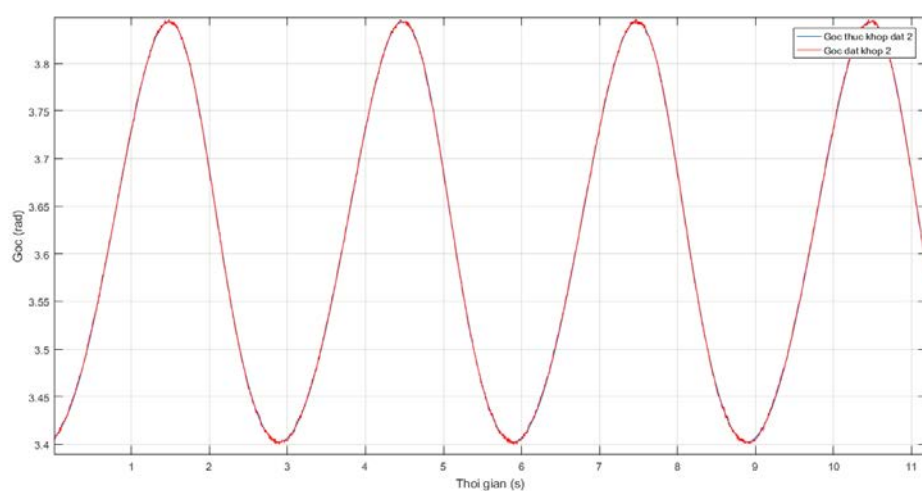
**Hình 5.21.** Đồ thị kết quả điều khiển khớp chủ động 1



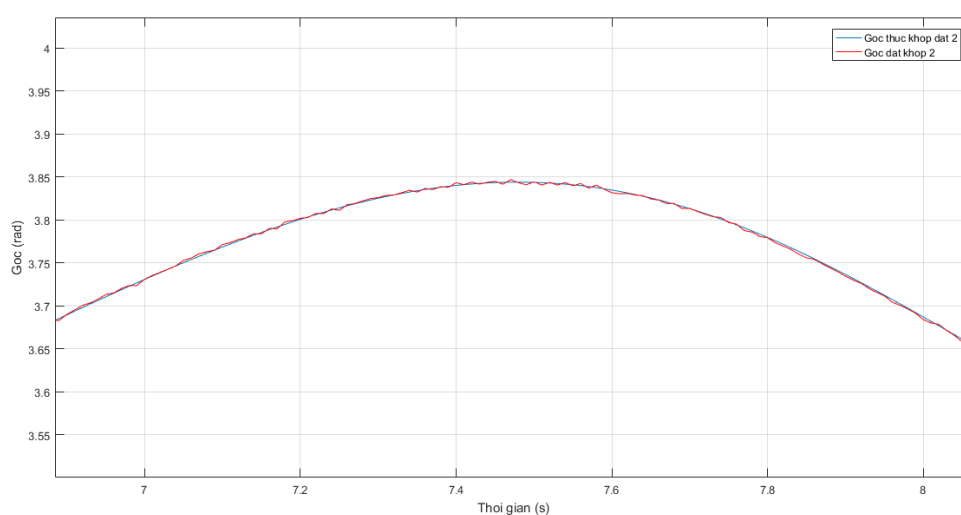
**Hình 5.22.** Phóng to kết quả tại vị trí đỉnh của góc chủ động 1



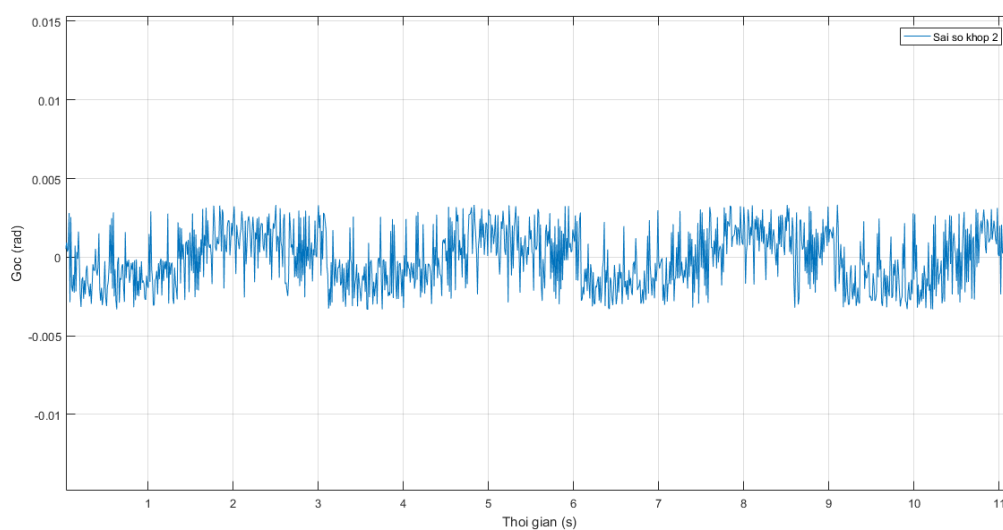
**Hình 5.23.** Đồ thị sai số góc điều khiển của khớp chủ động 1



**Hình 5.24.** Đồ thị kết quả điều khiển khớp chủ động 2

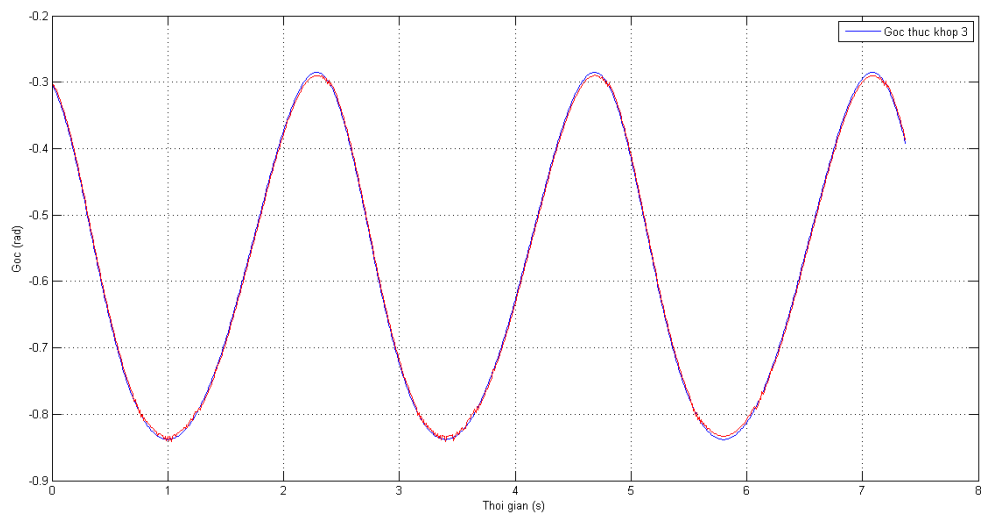


**Hình 5.25.** Phóng to kết quả tại vị trí đỉnh của góc chủ động 2

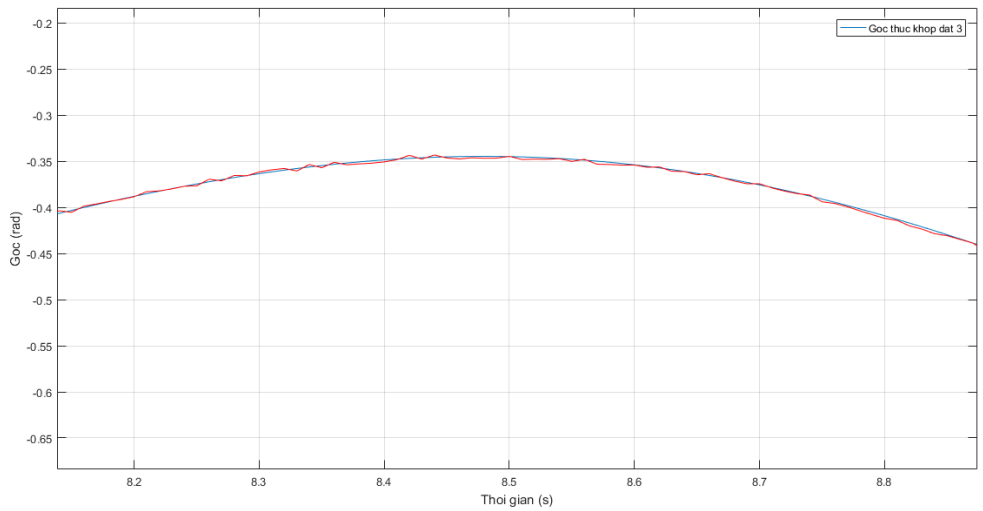


**Hình 5.26.** Đồ thị sai số góc điều khiển của khớp chủ động 1

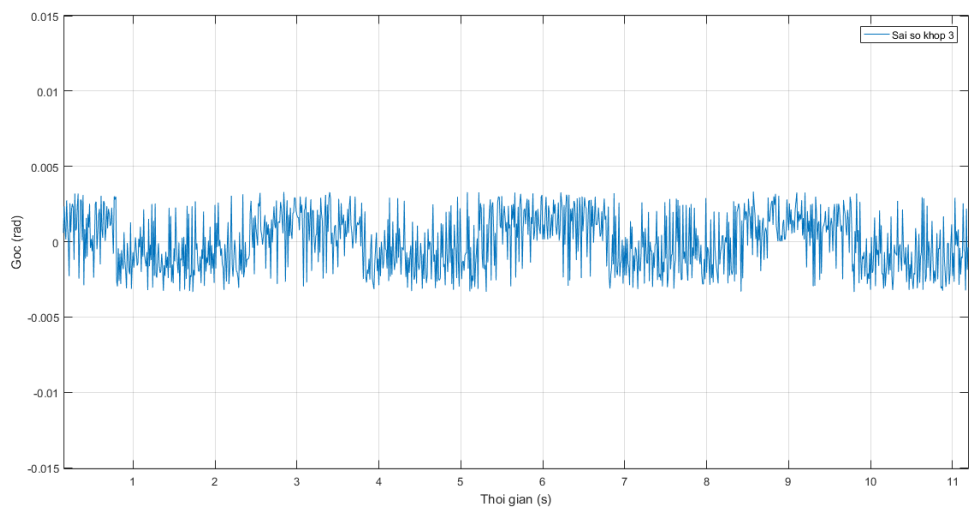




**Hình 5.27.** Đồ thị kết quả điều khiển khớp chủ động 3

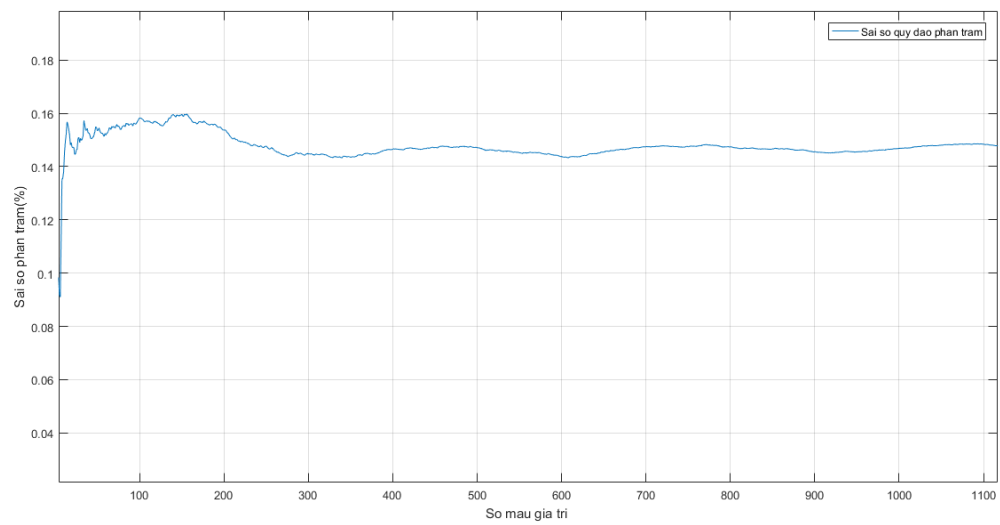


**Hình 5.28.** Phóng to kết quả tại vị trí đỉnh của góc chủ động 3



**Hình 5.29.** Đồ thị sai số góc điều khiển của khớp chủ động 3





**Hình 5.30.** Sai số tương đối của điều khiển tám quỹ đạo (%)

## **KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN ĐỀ TÀI**

### **KẾT LUẬN**

Đóng góp chính của đề tài là đã nghiên cứu, đề xuất được một bộ điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho tay máy robot song song phẳng ở dạng tổng quát. Bộ điều khiển được xây dựng trên cơ sở kết hợp sử dụng phương pháp điều khiển đồng bộ, trong đó thực hiện các tính toán về sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo của các khớp chủ động, kết hợp với thuật toán điều khiển tính mô-men, và điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo kết hợp với các bộ bù sai số. Kết quả của sự kết hợp này là bộ điều khiển mới có các ưu điểm như mang lại độ chính xác cao cho tay máy robot, giải quyết được vấn đề phức tạp của việc bù các thành phần bất định và nhiễu loạn từ bên ngoài. Trong bộ điều khiển đề xuất, tham số của mạng nơ-ron nhân tạo và đầu ra của các bộ bù sai số được chỉnh định online trong quá trình robot hoạt động để bù chính xác và thích nghi với các thành phần bất định cũng như nhiễu loạn từ bên ngoài. Sự ổn định của hệ thống kín được đảm bảo bằng chứng minh toán học dựa theo lý thuyết ổn định Lyapunov. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh sự hiệu quả của phương pháp. Bên cạnh đó, đề tài cũng thực hiện chế tạo thử nghiệm một mô hình và đạt được kết quả bước đầu khả quan.

### **HƯỚNG PHÁT TRIỂN ĐỀ TÀI**

Với xu hướng phát triển mới về sử dụng tay máy robot song song trong nhiều lĩnh vực sản xuất, gia công cơ khí và cả dân dụng như hiện nay thì các tay máy robot song song đã và đang được ứng dụng rất phổ biến trong công nghiệp cũng như trong dân dụng. Bên cạnh đó, các ứng dụng trí tuệ nhân tạo, máy học vào trong điều khiển tay máy robot cũng đang được triển khai mạnh mẽ trong cuộc cách mạng công nghiệp 4.0. Do đó, hướng nghiên cứu tiếp theo của đề tài sẽ tập trung vào việc áp dụng các phương pháp điều khiển thông minh, mạng nơ-ron nhân tạo với các thuật toán chỉnh định online để nâng cao chất lượng hoạt động và độ chính xác của tay máy robot song song. Nhóm tác giả cũng sẽ tìm kiếm các nguồn kinh phí để chế tạo hệ thống thật, thử nghiệm các bộ điều khiển đề xuất trên hệ thống thật.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ren, Lu, James K. Mills, and Dong Sun. "Trajectory tracking control for a 3-DOF planar parallel manipulator using the convex synchronized control method." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16.4 (2008): 613-623.
- [2] F.X. Wu, et al., "Integrated design and PD control of high-speed closed-loop mechanisms", *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.* 124 (2002) pp522–528.
- [3] Kucuk, Serdar. "Energy minimization for 3-RRR fully planar parallel manipulator using particle swarm optimization." *Mechanism and Machine Theory* 62 (2013): 129-149.
- [4] P.R. Ouyang, et al., "An adaptive switching learning control method for trajectory tracking of robot manipulators", *Mechatronics*, 16 (2006) 51–61.
- [5] Shang, Weiwei, Shuang Cong, and Yaoxin Zhang. "Nonlinear friction compensation of a 2-DOF planar parallel manipulator." *Mechatronics* 18.7 (2008): 340-346.
- [6] Zhang, Yao-Xin, et al. "Modeling, identification and control of a redundant planar 2-DOF parallel manipulator." *International Journal of Control Automation and Systems* 5.5 (2007): 559-569.
- [7] Shang, Wei-wei, Shuang Cong, and Shi-long Jiang. "Dynamic model based nonlinear tracking control of a planar parallel manipulator." *Nonlinear Dynamics* 60.4 (2010): 597-606.
- [8] Le T. D., Kang H.-J., Suh Y.-S. and Ro Y.-S, An Online Self Gain Tuning Method Using Neural Networks for Nonlinear PD Computed Torque Controller of a 2-dof Parallel Manipulator, *Neurocomputing*, 2013.
- [9] Cheung, Jacob WF, and Yeung Sam Hung. "Robust learning control of a high precision planar parallel manipulator." *Mechatronics* 19.1 (2009): 42-55.

- [10] Le, Tien Dung, Hee-Jun Kang, and Young-Soo Suh. "Chattering-free neuro-sliding mode control of 2-DOF planar parallel manipulators." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10.1 (2013): 22.
- [11] Le, Tien Dung, and Hee-Jun Kang. "An adaptive tracking controller for parallel robotic manipulators based on fully tuned radial basic function networks." *Neurocomputing* 137 (2014): 12-23.
- [12] Begon, P., Pierrot, F., & Dauchez, P. (1995, May). Fuzzy sliding mode control of a fast parallel robot. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 1178-1183). IEEE.
- [13] Gao, G., Wen, J., Liu, X., & Zhang, Z. (2013). Synchronous smooth sliding mode control for parallel mechanism based on coupling analysis. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(3), 173.
- [14] J. Wittenburg, *Dynamic of System of Rigid bodies*: Stuttgart, FRG: B. G. Teubner, 1977.
- [15] J. Wittenburg, "Dynamics of multibody systems," in *XVth IUTAM/ICTAM Congress*, 1980.
- [16] J. Y. S. Luh and Y.-F. Zheng, "Computation of input generalized forces for robots with closed kinematic chain mechanisms," *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, vol. 1, pp. 95-103, 1985.
- [17] J. J. Murray and G. H. Lovell, "Dynamic modeling of closed-chain robotic manipulators and implications for trajectory control," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 522-528, 1989.
- [18] Y. Nakamura and M. Ghodoussi, "Dynamics computation of closed-link robot mechanisms with nonredundant and redundant actuators," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 294-302, 1989.
- [19] F. H. Ghorbel, O. Chetelat, R. Gunawardana, and R. Longchamp, "Modeling and set point control of closed-chain mechanisms: theory and

- experiment," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 801-815, 2000.
- [20] F. Ghorbel, "Modeling and PD control of closed-chain mechanical systems," in *Decision and Control, 1995., Proceedings of the 34th IEEE Conference on*, 1995, pp. 540-542 vol.1.
- [21] F. Ghorbel, Olivier Chételat, and Roland Longchamp, "A reduced model for constrained rigid bodies with application to parallel robots.," presented at the Proceedings of the IFAC Symposium on Robot Control, 1994.
- [22] Y. Nakamura and K. Yamane, "Dynamics computation of structure-varying kinematic chains and its application to human figures," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 124-134, 2000.
- [23] C. Hui, Y. Yiu-Kuen, and L. Zexiang, "Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 8, pp. 483-491, 2003.
- [24] Y. Y. Kuen, "Geometry, dynamics and control of parallel manipulators," PhD thesis, The Hong Kong University of Science and Technology, 2002.
- [25] H.-J. Kang and R. Freeman, "Evaluation of loop constraints for kinematic and dynamic modeling of general closed-chain robotic systems," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 8, pp. 115-126, 1994.
- [26] Merlet, J. P., *Parallel Robots*, 2nd ed. Springer, 2006.
- [27] H.R. Mohammadi Daniali, P.J. Zsombor-Murray, J. Angeles, "Singularity Analysis of a General Class of Planar Parallel Manipulators", *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1547-1552, 1995.
- [28] K.H. Patel, V.C. Nayakpara, Y.K. Patel, Y.D. Patel, "Workspace and singularity analysis of 3-RRR planar parallel manipulator", *International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms*, pp. 1071-1077, 2013.
- [29] Sun, Dong. "Position synchronization of multiple motion axes with adaptive coupling control." *Automatica* 39.6, pp. 997-1005, 2003.

- [30] Rodriguez-Angeles A, Nijmeijer H, “Mutual synchronization of robots via estimated state feedback: a cooperative approach”, *IEEE Trans Control Syst Technol* 12(4):542–554, 2004.
- [31] Chung S-J, Slotine EJ-J, “Cooperative robot control and concurrent synchronization of Lagrangian systems”, *IEEE Trans Rob* 25(3):686–700, 2009.
- [32] Zhao D, Li S, Gao F, “Fully adaptive feedforward feedback synchronized tracking control for stewart platform systems”, *Int J Control Autom Syst* 6(5):689–701, 2008.
- [33] Zhao D, Li S, Gao F, “Finite time position synchronised control for parallel manipulators using fast terminal sliding mode”, *Int J Syst Sci*, 40(8):829–843, 2009.
- [34] Nijmeijer, Hendrik, et al. *Synchronization of mechanical systems*. Vol. 46. Singapore: World Scientific, 2003.
- [35] Y. Koren, “Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, vol. 102, no. 4, pp. 265–272, 1980.
- [36] Cheng, Marvin H., Yue Juan Li, and Ezzat G. Bakhoun. "Controller synthesis of tracking and synchronization for multiaxis motion system." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 22.1 (2014): 378-386.
- [37] Li, Yunhua, Qi Zheng, and Liman Yang. "Design of robust sliding mode control with disturbance observer for multi-axis coordinated traveling system." *Computers & Mathematics with Applications* 64.5 (2012): 759-765.
- [38] Al-Ayasrah, Omar, et al. "Dual feed-back and feed-forward synchronized cross-coupled motion control for two-wheel mobile robot." *Robotic Sensors: Robotic and Sensor Environments, 2005. International Workshop on*. IEEE, 2005.

- [39] Feng, L., Y. Koren, and J. Borenstein. "Cross-coupling motion controller for mobile robots." *IEEE control systems* 13.6 (1993): 35-43.
- [40] Sun, Dong, et al. "Synchronous tracking control of parallel manipulators using cross-coupling approach." *The International Journal of Robotics Research* 25.11 (2006): 1137-1147.
- [41] Ren, Lu, James K. Mills, and Dong Sun. "Trajectory tracking control for a 3-DOF planar parallel manipulator using the convex synchronized control method." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16.4 (2008): 613-623.
- [42] Su, Yuxin, et al. "Integration of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of parallel manipulators." *IEEE Transactions on Robotics* 22.1 (2006): 202-207.
- [43] Ren, Lu, James K. Mills, and Dong Sun. "Adaptive synchronized control for a planar parallel manipulator: theory and experiments." *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 128.4 (2006): 976-979.
- [44] Shang, Weiwei, et al. "Active joint synchronization control for a 2-DOF redundantly actuated parallel manipulator." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 17.2 (2009): 416-423.
- [45] Ren, Lu, James K. Mills, and Dong Sun. "Experimental comparison of control approaches on trajectory tracking control of a 3-DOF parallel robot." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 15.5 (2007): 982-988.
- [46] T. D. Le, H.-J. Kang, Y.-S. Suh, and Y.-S. Ro, "An online self-gain tuning method using neural networks for nonlinear PD computed torque controller of a 2-dof parallel manipulator," *Neurocomputing*, 2012.

## **PHỤ LỤC**

**Phụ lục 1 – Bản photo thuyết minh của đề tài**

**Phụ lục 2 - Các sản phẩm khoa học của đề tài**

**Phụ lục 3 – Các sản phẩm đào tạo**

**Phụ lục 4 – Các sản phẩm ứng dụng**



## **PHỤ LỤC 1**

### **BẢN PHOTO THUYẾT MINH CỦA ĐỀ TÀI**

## PHỤ LỤC 2

### CÁC SẢN PHẨM KHOA HỌC CỦA ĐỀ TÀI

#### 1. 01 bài báo quốc tế thuộc danh mục SCIE:

[1] Quang Vinh Doan, Tien Dung Le, Quang Dan Le and Hee-Jun Kang, "A neural network–based synchronized computed torque controller for three degree-of-freedom planar parallel manipulators with uncertainties compensation." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15.2 (2018): 1729881418767307.

#### 2. 02 bài báo trên tạp chí trong nước:

[1] Lê Tiến Dũng, Lê Quang Dân, “Điều khiển đồng bộ tính mô-men cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 7(116).2017

[2] Dương Tấn Quốc, Lê Tiến Dũng, “Phân tích động học và các cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 5(114).2017-Quyển 1.

#### 3. 01 bài báo được đăng trong kỷ yếu Hội nghị quốc tế:

[1] Le, Tien Dung, and Quang Vinh Doan. "Fuzzy Adaptive Synchronized Sliding Mode Control Of Parallel Manipulators." *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*. ACM, 2018.

#### 4. 01 bài báo được đăng trong kỷ yếu Hội nghị trong nước:

[1] Lê Tiến Dũng, Đoàn Quang Vinh, Dương Tấn Quốc, “Thiết kế thuật toán Điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động”, *Kỷ yếu Hội nghị-Triển lãm quốc tế lần thứ 4 về Tự động hóa*, VCCA 2017, TP HCM.

## **PHỤ LỤC 3**

### **CÁC SẢN PHẨM ĐÀO TẠO**

#### **1. Đào tạo 01 Thạc sỹ bảo vệ thành công luận văn tốt nghiệp:**

Dương Tấn Quốc, lớp K31.TĐH, chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa. Tên đề tài luận văn: “Thiết kế thuật toán điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do” dưới sự hướng dẫn của TS. Lê Tiến Dũng (Quyết định giao đề tài số 162/QĐ-ĐHBK-ĐT, quyết định bảo vệ số 1227/QĐ-ĐHBK-ĐT).

#### **2. Đào tạo 01 chuyên đề Tiến sĩ cho nghiên cứu sinh:**

Nghiên cứu sinh Lê Ngọc Trúc, khóa 2016, ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Tên chuyên đề: “*Tham số hóa và mô phỏng tay máy công nghiệp sử dụng Blockset SimMechanics*”.

#### **3. Hướng dẫn 4 sinh viên bảo vệ xong đồ án tốt nghiệp đại học năm 2018:**

1, Nguyễn Khánh Hiệu, Nguyễn Quyền Anh, lớp 13TDH1, tên đề tài: “Nhận dạng tham số động lực học và hệ số ma sát cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do RRR”, bảo vệ tháng 6/2018.

2, Trương Thanh Nguyên, Lê Thị Trang, lớp 13TDH1, tên đề tài: “Nghiên cứu bộ điều khiển đồng bộ và thực nghiệm trên mô hình tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR”, bảo vệ tháng 6/2018.

## **PHỤ LỤC 4**

### **CÁC SẢN PHẨM ỨNG DỤNG**

- 1. Thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho tay máy robot song song 3 bậc tự do, đảm bảo sai số dưới 3%.**
- 2. Mô hình toán học mô tả hệ thống điều khiển tay máy robot song song phẳng sát với thực tiễn để làm cơ sở thiết kế thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi.**
- 3. Sơ đồ ứng dụng và các phương trình của thuật toán điều khiển đồng bộ thích nghi mới cho điều khiển bám quỹ đạo của tay máy robot song song phẳng.**