

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



HỒ SỸ PHƯƠNG

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG BỘ QUAN SÁT LỖI
VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI CHO ROBOT DI ĐỘNG
NON-HOLONOMIC**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

Hà Nội - 2026

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

HỒ SỸ PHƯƠNG

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG BỘ QUAN SÁT LỖI
VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI CHO ROBOT DI ĐỘNG
NON-HOLONOMIC**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

Mã số: 9 52 02 16

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

**KT. GIÁM ĐỐC
PHÓ GIÁM ĐỐC**



Nguyễn Thị Trung

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

TS. Ngô Mạnh Tiến

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)

TS. Ngô Duy Tân

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: "*Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic*" là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể người hướng dẫn là TS. Ngô Mạnh Tiến và TS. Ngô Duy Tân. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày 30 tháng 09 năm 2026

Tác giả luận án



Hồ Sỹ Phương

LỜI CẢM ƠN

Trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án tiến sĩ, tác giả đã nhận được sự quan tâm, hướng dẫn, giúp đỡ quý báu của nhiều tập thể và cá nhân.

Trước hết, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới tập thể người hướng dẫn khoa học là **TS. Ngô Mạnh Tiến** và **TS. Ngô Duy Tân** đã tận tình chỉ bảo, định hướng nghiên cứu, luôn động viên và tạo điều kiện thuận lợi để tác giả có thể hoàn thành luận án đúng định hướng khoa học và đạt được các mục tiêu đề ra.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn các nhà khoa học, các thầy cô, đồng nghiệp đã đóng góp những ý kiến quý báu, chia sẻ kinh nghiệm chuyên môn và hỗ trợ tác giả trong quá trình nghiên cứu, thảo luận học thuật và hoàn thiện nội dung luận án.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn trân trọng tới Ban Lãnh đạo Học viện Khoa học và Công nghệ, Phòng Đào tạo cùng các phòng, ban chức năng của Học viện, đã quan tâm, hỗ trợ và tạo điều kiện trong suốt quá trình đào tạo, nghiên cứu và hoàn tất các thủ tục cần thiết để luận án được hoàn thành đúng quy định.

Đặc biệt, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới Gia đình – những người luôn yêu thương, động viên, chia sẻ khó khăn và là điểm tựa tinh thần vững chắc, giúp tác giả có thêm nghị lực và niềm tin để vượt qua những thử thách trong quá trình học tập và nghiên cứu khoa học.

Mặc dù đã rất nỗ lực, song luận án khó tránh khỏi những hạn chế nhất định. Tác giả kính mong nhận được sự cảm thông và những ý kiến đóng góp quý báu của các nhà khoa học, thầy cô và đồng nghiệp để tiếp tục hoàn thiện các kết quả nghiên cứu trong thời gian tới.

Xin trân trọng cảm ơn!

Hà Nội, ngày 30 tháng 09 năm 2026

Tác giả luận án



Hồ Sỹ Phương

MỤC LỤC

	Trang
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ KÝ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC BẢNG	ix
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	x
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ QUAN SÁT TRẠNG THÁI, PHÁT HIỆN LỖI VÀ ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI CHO ROBOT DI ĐỘNG NON-HOLONOMIC	7
1.1. Giới thiệu về robot di động non-holonomic	7
1.1.1. Robot di động non-holonomic và các thách thức trong điều khiển chịu lỗi	7
1.1.2. Lỗi cơ cấu chấp hành và vai trò của điều khiển – quan sát trong NWMR	8
1.2. Tổng quan về các phương pháp điều khiển cho NWMR	10
1.2.1. Các phương pháp điều khiển cổ điển và hạn chế	10
1.2.2. Điều khiển phi tuyến và yêu cầu kết hợp quan sát	11
1.2.3. Các kỹ thuật học và điều khiển dự báo trong robot di động.....	12
1.2.4. Điều khiển chịu lỗi và xu hướng nghiên cứu	14
1.3. Các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi.....	15
1.3.1. Vai trò của bộ quan sát trong hệ thống NWMR	15
1.3.2. Tổng quan các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi dựa trên mô hình	16
1.4. Các hướng nghiên cứu kết hợp bộ quan sát – điều khiển chịu lỗi trong hệ thống NWMR	18
1.4.1. Kiến trúc tích hợp bộ quan sát và điều khiển cho NWMR.....	18
1.4.2. Điều khiển chịu lỗi trên cơ sở quan sát–điều khiển cho NWMR..	20
1.4.3. Tình hình nghiên cứu trong nước về điều khiển robot di động và những vấn đề còn tồn tại.....	22
1.5. Khoảng trống nghiên cứu của luận án.....	24
1.6. Kết luận chương 1	26
CHƯƠNG 2. PHÁT TRIỂN BỘ QUAN SÁT VÀ PHÁT HIỆN LỖI CƠ CẤU CHẤP HÀNH CHO NWMR	27
2.1. Mô hình toán học của robot di động non-holonomic có lỗi cơ cấu chấp hành	28
2.1.1. Phương trình động học robot.....	29

2.1.2. Mô hình sai số bám và ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành	30
2.1.3. Phương trình động lực học	31
2.1.4. Mô hình động lực học với ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành...	34
2.2. Thiết kế bộ quan sát trạng thái và lỗi cơ cấu chấp hành	37
2.2.1. Bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành	37
2.2.2. Thiết kế bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành cải tiến	38
2.2.3. Thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng	41
2.3. Mô phỏng kiểm chứng các bộ quan sát	46
2.3.1. Cài đặt mô hình mô phỏng trên MATLAB/Simulink	46
2.3.2. Kết quả mô phỏng và đánh giá	48
2.4. Kết luận chương 2	50
CHƯƠNG 3. KIẾN TRÚC ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI PHÂN TẦNG DƯA TRÊN CÁC BỘ QUAN SÁT CHO NWMR	51
3.1. Điều khiển chịu lỗi cho NWMR dựa trên i-PID và bộ quan sát lỗi	51
3.1.1. Bộ điều khiển động học bám quỹ đạo	52
3.1.2. Bộ điều khiển động lực học dựa trên i-PID và MFC	53
3.1.3. Mô phỏng và đánh giá	55
3.2. Điều khiển trượt chịu lỗi cho NWMR dựa trên cấu trúc quan sát kép..	60
3.2.1. Bộ quan sát mở rộng hệ số khuếch đại cao	60
3.2.2. Điều khiển trượt thích nghi trên cơ sở bộ quan sát HiGO	62
3.2.3. Phân tích tính ổn định	63
3.2.4. Kết quả mô phỏng, nhận xét và thảo luận	68
3.3. Điều khiển chịu lỗi phân tầng cho NWMR dựa trên FB-IFO và SMC-ESO	73
3.3.1. Bộ điều khiển tầng động lực học dựa trên SMC-ESO	74
3.3.2. Bộ điều khiển tầng động học trên cơ sở kết hợp FLC và IFO	77
3.3.3. Kết quả mô phỏng, nhận xét đánh giá	81
3.4. Kết luận chương 3	87
CHƯƠNG 4. ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI VỚI RÀNG BUỘC HIỆU NĂNG CHO NWMR.....	89
4.1. Mô hình NWMR có xét lỗi cơ cấu chấp hành, lệch trọng tâm và trượt bánh	89
4.2. Điều khiển trượt tích phân toàn cục kết hợp với bộ quan sát nhiễu cải tiến	94
4.2.1. Bộ quan sát nhiễu cải tiến	94

4.2.2. Điều khiển trượt tích phân toàn cục với ràng buộc hiệu năng định trước	97
4.3. Kết quả mô phỏng và đánh giá	100
4.3.1. Thiết lập mô phỏng	100
4.3.2. Kết quả và đánh giá	101
4.4. Kết luận chương 4	105
KẾT LUẬN	107
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	109
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	111
PHỤ LỤC	PL-1

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Ý nghĩa	Đơn vị
r	Bán kính bánh xe	m
$2h$	Khoảng cách giữa 2 bánh xe chủ động	m
m	Tổng khối lượng robot	Kg
I	Tổng mô men quán tính của robot	$Kg.m^2$
q	Véc tơ vị trí robot trong hệ tọa độ Oxy $q=[x \ y \ \theta]^T$	
v	Vận tốc tịnh tiến của robot	m/s
v_d	Vận tốc tịnh tiến tham chiếu của robot	m/s
ω	Vận tốc góc của robot	rad/s
ω_d	Vận tốc góc tham chiếu của robot	rad/s
ω_1	Vận tốc góc của bánh phải	rad/s
ω_2	Vận tốc góc của bánh trái	rad/s
v_f	Vận tốc tịnh tiến thực tế của robot	m/s
ω_f	Vận tốc góc thực tế của robot	rad/s
Δv	Lỗi trên vận tốc tịnh tiến của robot	m/s
$\Delta \omega$	Lỗi trên vận tốc góc của robot	rad/s
ϑ	Véc tơ vận tốc của robot $\vartheta = [v \ \omega]^T$	
u_{mi}	Điện áp điều khiển tác động lên động cơ thứ i	V
τ_i	Mô-men điện từ sinh ra bởi động cơ	$torq$
L_m	Cảm kháng phản ứng	H
R_m	Điện trở phản ứng	ohm
I_{mi}	Dòng điện phản ứng	A
ε_{mi}	Sức điện động phản kháng	V
ω_{mi}	Tốc độ quay của trục động cơ	rad/s
k_τ	Hằng số mô men xoắn của động cơ	
k_e	Hằng số điện động động cơ	

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

AFSMC	Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control	Điều khiển trượt mờ thích nghi
AFTC	Active Fault Tolerant Control	Điều khiển chịu lỗi chủ động
ASMC	Adaptive Sliding Mode Control	Điều khiển trượt thích nghi
DO	Disturbance Observer	Bộ quan sát nhiễu
DOA	Dual Observer Aided Sliding Mode Control	Điều khiển trượt có hỗ trợ bởi hai bộ quan sát
EHGO	Extended High-Gain Observer	Bộ quan sát độ lợi cao mở rộng
ESO	Extended State Observer	Bộ quan sát trạng thái mở rộng
FDD	Fault Detection and Diagnosis	Phát hiện và chẩn đoán lỗi
FO	Faults Observer	Bộ quan sát lỗi
FTC	Fault Tolerant Control	Điều khiển chịu lỗi
FTSMC	Fast Terminal Sliding Mode Control	Điều khiển trượt đầu cuối nhanh
GISMC	Global Integrate Sliding Mode Control	Điều khiển trượt toàn cục
HiGO	High-Gain Observer	Bộ quan sát độ lợi cao
HOICD	Higher-Order Integral Chain Differentiator	Bộ vi phân chuỗi tích phân bậc cao
IAE	Integral of Absolute Error	Tích phân của trị tuyệt đối sai số
IDO	Improved Disturbance Observer	Bộ quan sát nhiễu cải tiến
IFO	Improver Faults Observer	Bộ quan sát lỗi cải tiến
IMU	Inertial Measurement Unit	Cảm biến đo quán tính
ISE	Integral of Squared Error	Tích phân của bình phương sai số
MFC	Model-Free Control	Điều khiển phi mô hình
MPC	Model Predictive Control	Điều khiển dự báo
NTSMC	Non-singular Terminal Sliding Mode Control	Điều khiển trượt đầu cuối không kỳ dị

NWMR	Non-hoholomic Wheeled Mobile Robot	Robot di động có bánh xe Non-holonomic
PFTC	Passive Fault Tolerant Control	Điều khiển chịu lỗi thụ động
PID	Proportional – Integral – Derivative	Bộ điều khiển tỉ lệ – tích phân – vi phân
PPC	Prescribed Performance Control	Điều khiển hiệu năng định trước
PPF	Prescribed Performance Function	Hàm hiệu năng định trước
SMC	Sliding Mode Control	Điều khiển trượt
SMO	Sliding Mode Observer	Bộ quan sát trượt
TSMC	Teminal Sliding Mode Control	Điều khiển trượt đầu cuối
UUB	Uniformly Ultimately Bounded	Bị chặn cuối cùng một cách đồng đều
UIO	Unknow Input Observer	Bộ quan sát đầu vào chưa biết

DANH MỤC BẢNG

	Trang
Bảng 1.1. Một số lỗi cơ bản và sự tác động đến hệ thống	8
Bảng 1.2. So sánh một số nghiên cứu liên quan trực tiếp về điều khiển NWMR	23
Bảng 2.1. Thông số mô hình robot sử dụng trong mô phỏng	47
Bảng 2.2. Thông số động cơ sử dụng trong mô phỏng	47
Bảng 2.3. Tham số các bộ quan sát sử dụng trong mô phỏng	47
Bảng 3.1. Các tham số của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO ...	55
Bảng 3.2. Giá trị tham số của bộ điều khiển và bộ quan sát	68
Bảng 3.3. Chỉ số hiệu năng bám đối với sai số hướng	72
Bảng 3.4. Chỉ số hiệu năng bám đối với sai số Euclid tổng (x, y)	72
Bảng 3.5. Giá trị tham số cho k_x	79
Bảng 3.6. Giá trị tham số cho k_y	79
Bảng 3.7. Giá trị tham số cho k_θ	80
Bảng 3.8. Giá trị tham số của SMC-PI, FSMC-PI, FB-IFO-SMC-ESO và bộ quan sát	82
Bảng 3.9. Chỉ số hiệu năng bám theo sai số Euclid tổng (x, y) của SMC-PI, FSMC-PI và FB-IFO-SMC-ESO	87
Bảng 4.1. Các tham số của robot NWMR có xét đến lệch trọng tâm và trượt bánh	101
Bảng 4.2. Các tham số của bộ điều khiển ASMC, SMC-IDO, GISMC-PPF	101
Bảng 4.3. Các chỉ số hiệu năng cho tổng sai số bám Euclid trong mặt phẳng (x,y) của GISMC-PPF, ASMC, SMC-IDO	104

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

	Trang
Hình 1.1. NWMR ứng dụng trong nhà máy, dịch vụ, y tế, công nghiệp	7
Hình 1.2. Các vùng hiệu suất của robot tự hành khi có tác động lỗi.....	9
Hình 1.3. Sơ đồ nguyên lý phát hiện lỗi dựa trên bộ quan sát	17
Hình 2.1. Cấu trúc robot di động non-holonomic	29
Hình 2.2. Bộ quan sát lỗi trong hệ thống điều khiển	38
Hình 2.3. Ước tính lỗi cơ cấu chấp hành qua vận tốc dài và vận tốc góc từ bộ FO	48
Hình 2.4. Ước tính lỗi cơ cấu chấp hành qua vận tốc và vận tốc góc của bộ IFO.....	48
Hình 2.5. Ước tính nhiễu tổng đạt được từ bộ quan sát trạng thái mở rộng	49
Hình 2.6. Ước tính vận tốc, vận tốc góc trên bộ quan sát trạng thái mở rộng	49
Hình 3.1. Mô tả cấu trúc và chuyển động của NWMR	52
Hình 3.2. Cấu trúc bộ điều khiển MFC-iPID-FO	54
Hình 3.3. Tín hiệu điều khiển của 3 bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO trong trường hợp 1	56
Hình 3.4. Sai lệch bám quỹ đạo theo trục x, y và góc θ	57
Hình 3.5. Quỹ đạo bám của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO trong trường hợp 1	57
Hình 3.6. Sai lệch bám của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO khi có lỗi cơ cấu chấp hành	58
Hình 3.7. Tín hiệu vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO	59
Hình 3.8. Kết quả ước tính lỗi trên NWMR	59
Hình 3.9. Quỹ đạo bám của robot trong trường hợp 2	60
Hình 3.10. Cấu trúc của bộ điều khiển DOA-SMC	61
Hình 3.11. Sai số bám trạng thái: (a) x_e ; (b) y_e ; (c) θ_e ; và (d) $\ e_q\ $	69
Hình 3.12. Tín hiệu điều khiển: (a) vận tốc tuyến tính và (b) vận tốc góc .	70
Hình 3.13. Ước lượng của các bộ quan sát: (a) lỗi vận tốc dài thông qua FO; (b) lỗi vận tốc góc thông qua FO; (c) vị trí theo trục X và Y thông qua HiGO; (d) góc định hướng từ HiGO	70
Hình 3.14. Kết quả bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi	71
Hình 3.15. Cấu trúc bộ điều khiển FB-IFO-SMC-ESO	73

Hình 3.16. Cấu trúc của bộ điều khiển vòng trong – SMC-ESO	74
Hình 3.17. Cấu trúc của bộ điều khiển vòng ngoài – FB-IFO	77
Hình 3.18. Cấu trúc của bộ điều khiển logic mờ	78
Hình 3.19. Sai lệch bám theo vị trí của robot (a) X-axes; (b) Y-axes; (c) θ	83
Hình 3.20. Tín hiệu vận tốc: (a) vận tốc dài, (b) vận tốc góc	83
Hình 3.21. Ước tính tổng nhiễu trên ESO	83
Hình 3.22. Quỹ đạo của robot tương ứng với các bộ điều khiển	84
Hình 3.23. Ước tính lỗi từ bộ IFO	84
Hình 3.24. Sai lệch bám theo quỹ đạo hình số 8: (a) X-axes; (b) Y-axes; (c) θ	85
Hình 3.25. Tín hiệu vận tốc đạt được: (a) vận tốc dài, (b) vận tốc góc	86
Hình 3.26. Quỹ đạo bám của robot theo hình số 8	86
Hình 4.1. Cấu trúc của NWMR trong trường hợp trọng tâm bị lệch	89
Hình 4.2. Sơ đồ khối của bộ điều khiển GISMC-PPF	99
Hình 4.3. Sai lệch bám theo các trục X, Y và θ	102
Hình 4.4. Hệ số điều chỉnh của bộ quan sát IDO	102
Hình 4.5. Ước lượng lỗi và tổng ảnh hưởng của nhiễu và trượt bánh	103
Hình 4.6. Phát hiện lỗi	103
Hình 4.7. Vận tốc tịnh tiến (a) và vận tốc góc (b) của robot	103
Hình 4.8. Quỹ đạo bám đường đi của robot	103

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ robot và trí tuệ nhân tạo trong những năm gần đây đã thúc đẩy việc ứng dụng rộng rãi các robot di động sử dụng bánh xe non-holonomic (Non-holonomic Wheeled Mobile Robots – NWMR) trong nhiều lĩnh vực quan trọng như giao thông thông minh, sản xuất công nghiệp, logistics, nông nghiệp tự động, y tế và quốc phòng. Nhờ cấu trúc cơ khí đơn giản, khả năng cơ động cao và chi phí triển khai hợp lý, các hệ robot này ngày càng đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống tự hành hiện đại, góp phần nâng cao năng suất, tối ưu hóa chi phí và giảm thiểu sự can thiệp trực tiếp của con người trong các môi trường nguy hiểm hoặc khó tiếp cận.

Tuy nhiên, trong quá trình vận hành thực tế, một thách thức cốt lõi đối với các hệ robot tự hành là đảm bảo tính ổn định, độ tin cậy và khả năng bám quỹ đạo chính xác trong điều kiện tồn tại sai hỏng và bất định. Đặc biệt, đối với NWMR, các ràng buộc động học kết hợp với đặc tính phi tuyến của hệ thống khiến việc duy trì hiệu suất điều khiển trở nên khó khăn hơn khi xảy ra lỗi.

Trong số các dạng sai hỏng có thể xuất hiện, lỗi cơ cấu chấp hành được xem là một trong những lỗi nghiêm trọng nhất do ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng sinh vận tốc và điều hướng của robot. Lỗi cơ cấu chấp hành có thể phát sinh từ nhiều nguyên nhân như hao mòn cơ khí, suy giảm hiệu suất động cơ, trượt bánh, mất kết nối trong hệ truyền động hoặc thay đổi điều kiện môi trường làm việc. Nếu không được phát hiện và xử lý kịp thời, các lỗi này có thể gây ra sai lệch quỹ đạo nghiêm trọng, làm suy giảm chất lượng điều khiển, thậm chí dẫn đến mất ổn định hoặc ngừng hoạt động của hệ thống. Điều này đặc biệt nguy hiểm đối với các ứng dụng yêu cầu độ chính xác và độ tin cậy cao như xe tự hành, robot y tế hoặc robot làm việc trong môi trường khắc nghiệt.

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu liên quan đến điều khiển và phát hiện lỗi cho robot tự hành, phần lớn các phương pháp hiện có vẫn còn những hạn chế đáng kể khi xử lý lỗi cơ cấu chấp hành. Nhiều nghiên cứu tập trung chủ yếu vào lỗi cảm biến hoặc nhiễu mô hình, trong khi lỗi cơ cấu chấp hành – yếu tố tác động trực tiếp đến tín hiệu điều khiển – chưa được xem xét một cách đầy đủ và có hệ thống. Bên cạnh đó, các bộ quan sát lỗi hiện tại thường gặp khó khăn về quá trình quá độ ban đầu, tốc độ hội tụ hoặc yêu cầu các giả thiết mạnh như điều kiện kích thích bền vững. Đồng thời, nhiều chiến lược điều khiển chịu lỗi vẫn dựa trên các cấu trúc cố định, thiếu khả năng tích hợp hiệu quả thông tin lỗi ước lượng vào luật điều khiển trong điều kiện vận hành thực tế.

Xuất phát từ những hạn chế nêu trên, việc nghiên cứu và phát triển một hệ thống quan sát trạng thái và ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành chính xác, kết hợp với chiến lược điều khiển chịu lỗi phù hợp cho NWMR, là một yêu cầu mang tính cấp thiết cả về mặt khoa học và thực tiễn. Một hệ thống như vậy không chỉ giúp phát hiện và bù lỗi kịp thời mà còn đảm bảo robot duy trì được tính ổn định và chất lượng bám quỹ đạo ngay cả khi xảy ra sự cố trong hệ truyền động.

Từ nhu cầu đó, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài luận án: “*Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic*”. Kết quả nghiên cứu của luận án được kỳ vọng sẽ góp phần nâng cao tính tự chủ, độ tin cậy và hiệu quả vận hành của NWMR, qua đó mở rộng khả năng ứng dụng của các hệ robot này trong các lĩnh vực kỹ thuật và công nghiệp hiện đại.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu và phát triển các phương pháp điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic nhằm đảm bảo khả năng bám quỹ đạo chính xác và ổn định trong điều kiện tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành, nhiễu và bất định mô hình. Cụ thể, luận án tập trung phân tích và mô hình hóa ảnh hưởng của lỗi đến động học và sai số bám; xây dựng các phương pháp quan sát trạng thái và phát hiện lỗi; đồng thời thiết kế các bộ quan sát và luật điều khiển chịu lỗi theo hướng phi tuyến và kiến trúc phân tầng, qua đó nâng cao hiệu quả bù lỗi, cải thiện đáp ứng và chất lượng bám quỹ đạo của hệ.

3. Nội dung nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu bài toán quan sát trạng thái, ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành và điều khiển chịu lỗi cho NWMR. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án bao gồm:

- 1) Xây dựng mô hình động học mở rộng của NWMR có xét đến ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu gộp chưa biết, làm cơ sở cho thiết kế bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi.
- 2) Phân tích đặc điểm và cơ chế tác động của lỗi cơ cấu chấp hành đến vận tốc và sai số bám quỹ đạo của robot, trong đó lỗi cơ cấu chấp hành được mô hình hóa dưới dạng tín hiệu bất định tương đương trong hệ động học.
- 3) Nghiên cứu và cải tiến bộ quan sát lỗi phi tuyến, cho phép đồng thời ước lượng trạng thái chưa đo được và tái tạo tín hiệu lỗi cơ cấu chấp hành, đảm bảo độ tin cậy của tín hiệu ước lượng khi tích hợp vào vòng điều khiển.
- 4) Thiết kế bộ điều khiển chịu lỗi ở tầng động học/quỹ đạo, sử dụng trực tiếp thông tin lỗi ước lượng từ bộ quan sát nhằm bù lỗi cơ cấu chấp hành và duy trì ổn định hệ thống trong điều kiện xảy ra lỗi.

5) Tích hợp bộ quan sát và bộ điều khiển thành một hệ thống hoàn chỉnh, đồng thời đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất thông qua mô phỏng số.

Nghiên cứu được giới hạn trong phạm vi sau:

- Đối tượng nghiên cứu: Luận án tập trung vào NWMR có hai bánh chủ động. Các cấu trúc robot khác không thuộc phạm vi nghiên cứu của luận án.

- Loại lỗi được xem xét: Nghiên cứu tập trung vào lỗi cơ cấu chấp hành, được mô hình hóa dưới dạng tín hiệu bất định ảnh hưởng trực tiếp đến vận tốc của robot. Các lỗi cảm biến và lỗi truyền thông không phải là đối tượng nghiên cứu chính của luận án.

- Phương pháp tiếp cận: Bộ quan sát lỗi được xây dựng dựa trên các cấu trúc quan sát phi tuyến hiện có và được cải tiến để phù hợp với bài toán quan sát lỗi cơ cấu chấp hành trong hệ non-holonomic. Bộ điều khiển chịu lỗi được thiết kế dựa trên cơ sở kết hợp các bộ quan sát và các bộ điều khiển phi tuyến hiện đại. Việc kiểm chứng được thực hiện thông qua mô phỏng trên MATLAB/Simulink.

- Giới hạn nghiên cứu: Luận án không xem xét các bài toán tránh vật cản, va chạm hoặc điều hướng trong môi trường phức tạp.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu kết hợp giữa phân tích lý thuyết, mô phỏng số nhằm xây dựng, kiểm chứng và đánh giá hiệu quả của hệ thống quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR.

Trước hết, phương pháp phân tích lý thuyết được sử dụng để xây dựng cơ sở khoa học cho luận án. Trên cơ sở khảo sát và tổng hợp các công trình nghiên cứu liên quan đến quan sát trạng thái, ước lượng lỗi và điều khiển chịu lỗi cho robot tự hành, mô hình động học mở rộng của NWMR có xét đến lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu gộp chưa biết được thiết lập. Lỗi cơ cấu chấp hành được mô hình hóa dưới dạng tín hiệu bất định tương đương tác động trực tiếp lên vận tốc robot, làm cơ sở cho việc thiết kế bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi. Đồng thời, các tiêu chí đánh giá hiệu suất như độ chính xác ước lượng lỗi, thời gian đáp ứng và sai số bám quỹ đạo được xác định để phục vụ quá trình đánh giá.

Tiếp theo, phương pháp thiết kế thuật toán được áp dụng để phát triển bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi. Bộ quan sát lỗi được xây dựng dựa trên các cấu trúc quan sát phi tuyến hiện có và được cải tiến nhằm nâng cao khả năng ước lượng trạng thái chưa đo được và tái tạo tín hiệu lỗi cơ cấu chấp hành trong hệ non-holonomic. Trên cơ sở tín hiệu lỗi ước lượng, bộ điều khiển chịu lỗi được thiết kế ở tầng động học/quỹ đạo nhằm bù lỗi cơ cấu chấp hành và đảm bảo ổn định hệ thống. Tính ổn định và hội tụ của hệ thống được phân tích bằng phương pháp Lyapunov.

Sau khi hoàn thiện thiết kế, phương pháp mô phỏng số được sử dụng để kiểm chứng hiệu quả của các thuật toán đề xuất. Các mô phỏng được thực hiện trên nền tảng MATLAB/Simulink với các kịch bản lỗi cơ cấu chấp hành khác nhau. Hiệu suất của bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi được đánh giá thông qua khả năng tái tạo lỗi, sai số bám quỹ đạo và đáp ứng quá độ của hệ thống, đồng thời được so sánh với các phương pháp tham chiếu nhằm làm rõ ưu điểm của phương pháp đề xuất.

5. Cơ sở khoa học và thực tiễn của đề tài

a. Ý nghĩa khoa học

Luận án có ý nghĩa khoa học trong việc bổ sung và làm rõ cơ sở lý thuyết cho bài toán quan sát và điều khiển chịu lỗi đối với NWMR, đặc biệt trong trường hợp xuất hiện lỗi cơ cấu chấp hành. Cụ thể:

- Luận án xây dựng và sử dụng mô hình động học mở rộng của NWMR có xét đến lỗi cơ cấu chấp hành và nhiều gộp chưa biết, qua đó làm rõ mối quan hệ giữa lỗi cơ cấu chấp hành và sai lệch trạng thái của robot. Mô hình này tạo cơ sở toán học phù hợp cho việc phân tích, thiết kế bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi trong các hệ non-holonomic.

- Các kết quả nghiên cứu của luận án góp phần làm phong phú thêm lý thuyết về quan sát trạng thái và tái tạo lỗi cho các hệ phi tuyến bị ràng buộc non-holonomic, thông qua việc cải tiến các cấu trúc bộ quan sát hiện có để nâng cao độ chính xác và khả năng hội tụ của ước lượng lỗi.

- Luận án góp phần làm rõ vai trò của kiến trúc kết hợp giữa bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi trong việc đảm bảo ổn định và khả năng bám quỹ đạo của NWMR khi xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành, qua đó bổ sung cơ sở lý thuyết cho các phương pháp điều khiển bền vững và thích nghi trong môi trường có bất định.

- Các phân tích ổn định và kết quả đạt được trong luận án có thể được xem như tài liệu tham khảo khoa học cho các nghiên cứu tiếp theo liên quan đến điều khiển chịu lỗi cho các hệ robot di động và các hệ phi tuyến có cấu trúc tương tự..

b. Ý nghĩa thực tiễn

Bên cạnh ý nghĩa khoa học, luận án có giá trị thực tiễn rõ ràng, thể hiện ở khả năng nâng cao độ tin cậy và tính tự chủ của robot tự hành trong điều kiện vận hành thực tế:

- Hệ thống quan sát và điều khiển chịu lỗi được đề xuất giúp phát hiện sớm và bù hiệu quả lỗi cơ cấu chấp hành, từ đó hạn chế sai lệch quỹ đạo và duy trì khả năng vận hành ổn định của robot ngay cả khi xảy ra suy giảm hiệu suất truyền động.

- Các thuật toán trong luận án có thể triển khai trực tiếp trên các nền tảng robot di động hai bánh chủ động, vốn được sử dụng phổ biến trong các ứng dụng logistics, robot dịch vụ và robot vận chuyển tự hành trong công nghiệp.

- Kết quả nghiên cứu của luận án cung cấp cơ sở kỹ thuật cho việc phát triển các hệ robot có khả năng tự chẩn đoán và thích nghi với lỗi, góp phần giảm nhu cầu giám sát và can thiệp thủ công trong quá trình vận hành.

- Các phương pháp đề xuất trong luận án có khả năng mở rộng và điều chỉnh để áp dụng cho các hệ thống di động thông minh khác, như xe tự hành tốc độ thấp hoặc các nền tảng robot hoạt động trong môi trường có mức độ an toàn yêu cầu cao.

6. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã đạt được một số đóng góp mới về mặt khoa học và phương pháp trong lĩnh vực quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR, tập trung chủ yếu vào lỗi cơ cấu chấp hành. Các đóng góp mới của luận án bao gồm:

- (1) Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

- (2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

7. Cấu trúc của luận án

Luận án được tổ chức thành bốn chương, cùng với phần mở đầu và phần kết luận chung, được xây dựng theo một trình tự logic nhằm đảm bảo tính chặt chẽ và xuyên suốt trong việc nghiên cứu, phát triển các phương pháp quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR.

Phần mở đầu trình bày tổng quan về đề tài nghiên cứu, trong đó làm rõ lý do lựa chọn đề tài, mục tiêu nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, phương pháp tiếp cận, cũng như ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án. Phần này đóng vai trò định hướng toàn bộ nội dung nghiên cứu, nhấn mạnh sự cần thiết của việc phát triển các giải pháp điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng tự chủ của robot di động trong điều kiện tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành, nhiễu và bất định mô hình.

Chương 1 trình bày tổng quan về NWMR và các công trình nghiên cứu liên quan đến điều khiển bám quỹ đạo, quan sát trạng thái, ước lượng lỗi và điều khiển chịu lỗi. Chương này phân tích các đặc điểm, thách thức và yêu cầu đặt ra trong bài toán điều khiển robot di động khi tồn tại nhiễu, bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành. Trên cơ sở khảo sát và so sánh các hướng tiếp cận tiêu biểu, chương chỉ ra các khoảng trống nghiên cứu, đặc biệt là sự thiếu vắng các kiến trúc điều khiển–quan sát

tích hợp và có hệ thống cho NWMR. Từ đó, mục tiêu nghiên cứu và các đóng góp khoa học chính của luận án được xác lập.

Chương 2 tập trung vào việc xây dựng mô hình toán học và phát triển các bộ quan sát cho NWMR có xét đến nhiễu, bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành. Trên cơ sở mô hình động học và động lực học của robot, chương làm rõ cấu trúc tác động của lỗi cơ cấu chấp hành ở các mức khác nhau và xây dựng các mô hình mở rộng phục vụ cho thiết kế bộ quan sát. Dựa trên các mô hình này, các bộ quan sát phi tuyến được đề xuất nhằm ước lượng trạng thái chưa đo được, nhiễu gộp và ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành. Tính ổn định và khả năng hội tụ của các bộ quan sát được phân tích chặt chẽ bằng phương pháp Lyapunov. Các kết quả mô phỏng được sử dụng để minh chứng hiệu quả và độ tin cậy của các cơ chế quan sát, làm nền tảng cho việc thiết kế điều khiển chịu lỗi ở các chương tiếp theo.

Chương 3 trình bày các kiến trúc điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát cho NWMR. Chương này phát triển các chiến lược điều khiển chịu lỗi từ các tiếp cận đơn giản đến các kiến trúc phân tầng, trong đó thông tin quan sát được tích hợp một cách có hệ thống vào luật điều khiển. Các bộ điều khiển được thiết kế nhằm đảm bảo khả năng bám quỹ đạo ổn định của robot ngay cả khi xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành, đồng thời nâng cao tính bền vững trước nhiễu và bất định mô hình. Tính ổn định của hệ thống điều khiển được chứng minh thông qua phân tích Lyapunov, và các kết quả mô phỏng được trình bày để đánh giá hiệu quả bù lỗi và chất lượng đáp ứng của các kiến trúc điều khiển đề xuất.

Chương 4 nghiên cứu một chiến lược điều khiển chịu lỗi có hiệu năng cao cho NWMR, nhằm bổ sung và đối chiếu với các kiến trúc phân tầng đã được trình bày ở Chương 3. Chương này tập trung vào việc kết hợp điều khiển trượt toàn cục với bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng bám quỹ đạo định trước, hướng tới đảm bảo hội tụ hữu hạn thời gian và kiểm soát chặt chẽ hành vi quá độ của sai số bám quỹ đạo trong điều kiện tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành và bất định mô hình. Các phân tích ổn định và kết quả mô phỏng được sử dụng để làm rõ hiệu năng và phạm vi áp dụng của chiến lược điều khiển đề xuất.

Phần kết luận chung và hướng phát triển tổng hợp các kết quả chính đạt được trong luận án, đánh giá ý nghĩa khoa học và thực tiễn của các phương pháp quan sát và điều khiển chịu lỗi được đề xuất, đồng thời chỉ ra các hạn chế còn tồn tại và đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo.

Cuối cùng, phụ lục và danh mục tài liệu tham khảo cung cấp các nội dung bổ trợ, bao gồm các chứng minh chi tiết, công thức quan trọng và các tài liệu đã được sử dụng trong quá trình nghiên cứu.

CHƯƠNG 1.

TỔNG QUAN VỀ QUAN SÁT TRẠNG THÁI, PHÁT HIỆN LỖI VÀ ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI CHO NWMR

1.1. Giới thiệu về NWMR

1.1.1. NWMR và các thách thức trong điều khiển chịu lỗi

NWMR là một lớp robot tự hành có ràng buộc chuyển động không tích phân, trong đó hệ không thể di chuyển tức thời theo mọi hướng trong không gian cấu hình do điều kiện lăn bánh không trượt theo phương ngang [1]. Với cấu trúc cơ khí đơn giản, chi phí vận hành thấp và đặc tính cơ động cao trong môi trường hạn chế, NWMR đã trở thành nền tảng phổ biến trong các ứng dụng robot tự hành hiện đại như vận chuyển tự động trong nhà máy, robot kho vận, khảo sát môi trường và robot dịch vụ [2]. Các cấu hình phổ biến của NWMR bao gồm robot hai bánh vi sai, robot nhiều bánh dẫn hướng và các nền tảng có động học tương đương hệ Ackermann.



Hình 1.1. NWMR ứng dụng trong nhà máy, dịch vụ, công nghiệp [85]

Về mặt mô hình toán học, NWMR có đặc tính động học và động lực học phi tuyến, chịu ảnh hưởng của ràng buộc non-holonomic, tương tác bánh xe – mặt nền, trượt bánh cục bộ, bất đối xứng truyền động, cũng như các bất định tham số và nhiễu môi trường [3]. Những yếu tố này khiến việc thiết kế bộ điều khiển trở nên phức tạp, ảnh hưởng lớn đến hiệu năng bám quỹ đạo, đặc biệt trong điều kiện vận hành thực tế.

Một thách thức quan trọng khác trong điều khiển NWMR là sự hạn chế về mặt đo lường các tham số của hệ thống. Nhiều biến trạng thái và nhiễu không thể đo trực tiếp bằng cảm biến do giới hạn về mặt kỹ thuật và chi phí cho phần cứng, làm gia

tăng sự phụ thuộc vào mô hình và các kỹ thuật ước lượng trạng thái. Do đó, việc kết hợp các phương pháp điều khiển phi tuyến với các bộ quan sát trạng thái hiệu quả là yêu cầu tất yếu trong các hệ NWMR hiện đại.

Những thách thức trên, đặc biệt trong điều kiện tồn tại bất định và sai lệch trong hệ truyền động, đặt nền tảng cho việc nghiên cứu các kiến trúc điều khiển–quan sát nâng cao cho NWMR, sẽ được phân tích chi tiết hơn trong mục tiếp theo.

1.1.2. Lỗi cơ cấu chấp hành và vai trò của kiến trúc điều khiển–quan sát trong NWMR

Trong các hệ NWMR, lỗi được định nghĩa là sự sai lệch bất thường của một hoặc nhiều thành phần hệ thống so với điều kiện vận hành danh định, dẫn đến suy giảm hiệu năng hoặc thay đổi hành vi động học của robot. Theo các khảo sát tổng quan kinh điển về chẩn đoán và điều khiển chịu lỗi trong hệ robot và hệ công nghiệp, lỗi có thể xuất hiện ở cơ cấu chấp hành, cảm biến, cấu trúc cơ khí hoặc thuật toán điều khiển [4], [5], [6].

Đối với robot di động, cấu trúc động học non-holonomic cùng với tương tác bánh - mặt nền và hiện tượng trượt làm cho hệ thống nhạy cảm hơn với sai lệch truyền động và nhiễu động học [1], [3]. Trong số các loại lỗi, lỗi cơ cấu chấp hành được xem là nhóm lỗi có ảnh hưởng nghiêm trọng nhất vì chúng tác động trực tiếp lên tín hiệu điều khiển vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của robot [7], [8].

Bảng 1.1. Một số lỗi cơ bản và sự tác động đến hệ thống

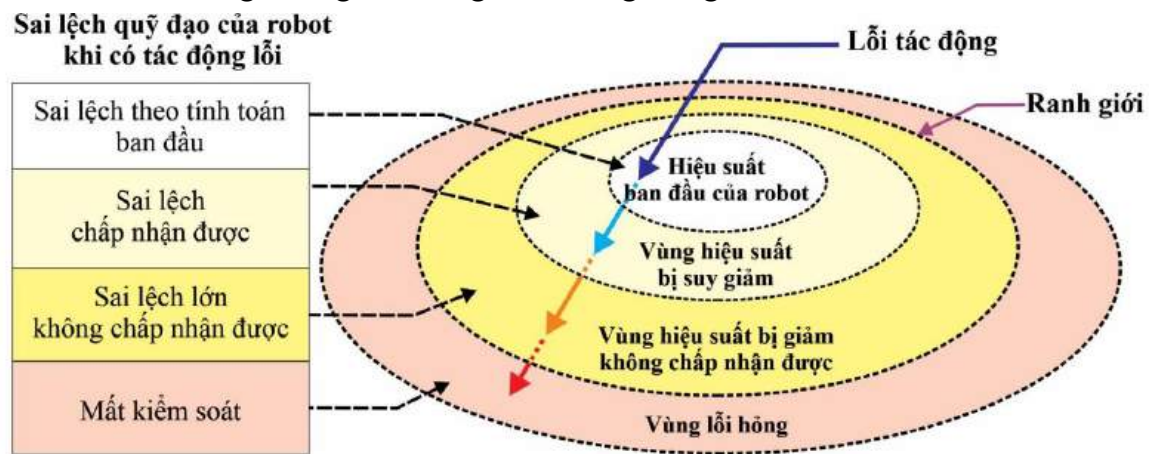
Loại sai hỏng	Kênh tác động	Ảnh hưởng chính	Phạm vi luận án
Suy giảm hiệu lực cơ cấu chấp hành	Đầu vào	Giảm mô-men/vận tốc	Có
Lỗi thiên lệch	Đầu vào	Sai lệch vận tốc	Có thể quy đổi
Lỗi kẹt	Đầu vào	Mất khả năng điều chỉnh	Chưa xét đầy đủ
Lỗi cảm biến	Đo lường	Phản hồi sai	Không xét
Lỗi do trượt bánh	Bánh – mặt nền	Sai lệch vận tốc thực	Xét như nhiễu/ bất định

Các dạng lỗi cơ cấu chấp hành phổ biến bao gồm: Suy giảm hiệu suất của cơ cấu chấp hành; Lỗi kẹt; Lỗi thiên lệch; Mất hiệu lực một phần hoặc hoàn toàn của bộ truyền động [7], [8], [9].

Do vận tốc của NWMR phụ thuộc trực tiếp vào mô-men hoặc tốc độ bánh chủ động, bất kỳ sai lệch nào trong truyền động đều dẫn đến sai lệch vận tốc thực tế so với giá trị điều khiển mong muốn, làm gia tăng sai số bám quỹ đạo và có thể gây mất ổn định nếu không được xử lý kịp thời [10], [11]. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng dưới tác động đồng thời của lỗi cơ cấu chấp hành và trượt bánh, chất lượng bám quỹ đạo có thể suy giảm nghiêm trọng nếu chỉ sử dụng các bộ điều khiển bền vững

thông thường [11], [12]. Trong phạm vi luận án, nghiên cứu tập trung vào các lỗi tác động lên bộ truyền động; ảnh hưởng của lỗi đến miền hiệu năng của robot được minh họa trong Hình 1.2.

Trong các hệ NWMR hiện đại, bộ điều khiển và bộ quan sát thường được thiết kế trong một cấu trúc phản hồi khép kín nhằm đảm bảo ổn định và nâng cao chất lượng bám quỹ đạo [13]. Về mặt lịch sử, các bộ quan sát tuyến tính như Luenberger observer [14] và bộ lọc Kalman [15] được sử dụng để ước lượng trạng thái không đo được. Tuy nhiên, do đặc tính phi tuyến của hệ non-holonomic, các bộ quan sát phi tuyến như high-gain observer (HiGO) [16], sliding mode observer (SMO) [17], unknown input observer (UIO) [18] và extended state observer (ESO) [29] đã được phát triển nhằm tăng cường khả năng ước lượng trong điều kiện nhiễu và bất định.



Hình 1.2. Các miền hiệu năng của robot tự hành khi chịu tác động của lỗi

Song song với sự phát triển của lý thuyết quan sát, nhiều phương pháp điều khiển phi tuyến cho NWMR đã được đề xuất, tiêu biểu như backstepping [20], điều khiển trượt [21], [22], điều khiển thích nghi [23], và các chiến lược hội tụ hữu hạn thời gian [24], [25]. Gần đây, xu hướng tích hợp trực tiếp bộ quan sát vào cấu trúc điều khiển để tạo thành kiến trúc điều khiển–quan sát tích hợp đã được nhấn mạnh trong các nghiên cứu về robot di động [13], [26], [27]. Kiến trúc này cho phép sử dụng trạng thái ước lượng hoặc nhiều ước lượng để cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo và tăng cường tính bền vững của hệ thống trước bất định mô hình và nhiễu ngoài [28], [29], [30]. Tuy nhiên, trong phần lớn các công trình, lỗi cơ cấu chấp hành thường được xem như một phần của nhiễu tổng hợp thay vì một đại lượng cần được quan sát và xử lý tường minh.

Trong lý thuyết điều khiển chịu lỗi (Fault-Tolerant Control – FTC), việc tích hợp bộ quan sát vào vòng điều khiển là nền tảng của các chiến lược điều khiển chịu lỗi chủ động [6], [7]. Theo các nghiên cứu về FTC cho robot di động, việc ước lượng

và bù lỗi theo thời gian thực giúp duy trì ổn định và hiệu năng chấp nhận được ngay cả khi xảy ra suy giảm hiệu lực cơ cấu chấp hành [8]-[12], [31]-[33].

Đặc biệt, các nghiên cứu gần đây nhấn mạnh vai trò của kiến trúc phân tầng và kiến trúc điều khiển–quan sát hai vòng, trong đó vòng ngoài đảm nhiệm điều khiển bám quỹ đạo và vòng trong xử lý động lực học và nhiễu, nhằm nâng cao hiệu quả bù lỗi toàn cục [11], [26], [36]. Tuy nhiên, việc tách biệt và ước lượng tường minh lỗi cơ cấu chấp hành như một đại lượng độc lập trong hệ NWMR vẫn còn hạn chế trong nhiều công trình hiện có [26]-[29].

Như vậy, kiến trúc kết hợp điều khiển–quan sát đóng vai trò trung tâm trong điều khiển chịu lỗi cho NWMR vì:

- Cho phép phát hiện và ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành theo thời gian thực [6], [37];
- Cung cấp tín hiệu lỗi ước lượng để thực hiện bù lỗi chủ động trong luật điều khiển [7], [32];
- Cải thiện tốc độ phục hồi và hành vi quá độ khi xảy ra lỗi [24], [33];
- Đảm bảo ổn định và duy trì chất lượng bám quỹ đạo trong môi trường có nhiễu và mức độ bất định cao [10], [11], [12].

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng, việc phát triển một kiến trúc điều khiển–quan sát tích hợp có khả năng tách biệt và ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành một cách tường minh là yêu cầu mang tính hệ thống đối với NWMR. Đây cũng chính là định hướng nghiên cứu trung tâm được theo đuổi trong luận án.

1.2. Tổng quan về các phương pháp điều khiển cho NWMR

1.2.1. Các phương pháp điều khiển cổ điển và hạn chế

Các phương pháp điều khiển cổ điển đóng vai trò nền tảng trong quá trình phát triển các chiến lược điều khiển cho NWMR. Trong giai đoạn đầu của nghiên cứu và ứng dụng, các bộ điều khiển tuyến tính dạng PID được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và khả năng hiệu chỉnh trực quan. Đối với các hệ NWMR hoạt động ở vận tốc thấp, quỹ đạo đơn giản và mức nhiễu nhỏ, điều khiển PID có thể đảm bảo ổn định cục bộ và giảm sai số bám quỹ đạo ở mức chấp nhận được, do đó thường được sử dụng trong các hệ AGV công nghiệp hoặc làm chuẩn so sánh trong các nghiên cứu học thuật [1], [2]. Tuy nhiên, việc áp dụng các bộ điều khiển PID thuần túy thường dẫn đến suy giảm đáng kể hiệu năng và không đảm bảo tính bền vững khi điều kiện vận hành thay đổi [1], [3]. Để mở rộng phạm vi ứng dụng của điều khiển tuyến tính, nhiều nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp tuyến tính hóa cục bộ hoặc tuyến tính hóa phản hồi, trong đó mô hình phi tuyến của robot được xấp xỉ về dạng tuyến tính quanh một điểm làm việc hoặc quỹ đạo tham chiếu. Cách tiếp cận này cho

phép sử dụng các công cụ điều khiển tuyến tính mạnh như LQR, pole placement hoặc H_∞ , qua đó đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ điều khiển [38].

Mặc dù các phương pháp tuyến tính hóa cho kết quả tốt trong các bài toán bám quỹ đạo gần quỹ đạo danh định và khi mô hình robot được xác định tương đối chính xác, hiệu năng điều khiển phụ thuộc chặt chẽ vào phạm vi tuyến tính hóa và độ chính xác của mô hình. Khi robot hoạt động xa điểm làm việc, xuất hiện nhiễu lớn hoặc xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành làm sai lệch vận tốc thực tế, các bộ điều khiển tuyến tính hóa thường không còn khả năng bù trừ hiệu quả và có thể dẫn đến mất ổn định [3], [38].

Bên cạnh các phương pháp tuyến tính, backstepping cơ bản là một trong những chiến lược đầu tiên áp dụng có hệ thống lý thuyết điều khiển phi tuyến cho NWMR. Phương pháp này dựa trên việc xây dựng hàm Lyapunov theo từng bước, cho phép xử lý trực tiếp cấu trúc phi tuyến và đảm bảo ổn định tiệm cận của hệ thống trong điều kiện mô hình xác định và có đầy đủ thông tin trạng thái. Tuy nhiên, backstepping cơ bản tỏ ra nhạy cảm với nhiễu, bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành, do các sai lệch có thể lan truyền và khuếch đại qua từng bước thiết kế, dẫn đến dao động điều khiển hoặc suy giảm độ chính xác bám quỹ đạo [3], [23].

Nhìn chung, các phương pháp điều khiển cổ điển như PID, tuyến tính hóa và backstepping cơ bản đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành nền tảng lý thuyết cho điều khiển NWMR và vẫn phù hợp trong các điều kiện vận hành lý tưởng hoặc ít bất định. Tuy nhiên, các phương pháp này chưa đủ khả năng đảm bảo tính bền vững và độ tin cậy khi hệ thống tồn tại phi tuyến, nhiễu không mô hình hóa hoặc lỗi cơ cấu chấp hành, từ đó thúc đẩy sự phát triển của các phương pháp điều khiển phi tuyến hiện đại và các chiến lược điều khiển chịu lỗi [7], [9], [21].

1.2.2. Điều khiển phi tuyến và yêu cầu kết hợp quan sát

Trước những hạn chế của các phương pháp điều khiển cổ điển trong việc xử lý phi tuyến, ràng buộc non-holonomic và bất định mô hình, nhiều chiến lược điều khiển phi tuyến hiện đại đã được phát triển cho NWMR. Các phương pháp này hướng đến việc đảm bảo ổn định toàn cục, cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo và tăng cường tính bền vững trước nhiễu và sai lệch tham số trong điều kiện vận hành thực tế [20], [21], [39].

Một trong những hướng tiếp cận tiêu biểu là điều khiển trượt (Sliding Mode Control – SMC), được đánh giá cao nhờ khả năng chống nhiễu và đảm bảo hội tụ hữu hạn thời gian [21], [40]. Tuy nhiên, SMC bậc nhất thường gây ra hiện tượng dao động vi mô (chattering), ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển và tuổi thọ cơ cấu chấp hành. Để khắc phục nhược điểm này, nhiều biến thể bậc cao như super-twisting hoặc các dạng điều khiển trượt đầu cuối không kỳ dị (NTSMC) đã được đề xuất, giúp cải thiện

tốc độ hội tụ và giảm đáng kể hiện tượng chattering trong các bài toán bám quỹ đạo cho robot di động [24], [30], [41], [42]. Gần đây, các nghiên cứu chuyển mạnh sang kết hợp điều khiển trượt hữu hạn/fixed-time với prescribed performance nhằm kiểm soát đồng thời tốc độ hội tụ và hành vi quá độ của sai số bám [86], [87]. Bên cạnh đó, prescribed-time SMC tiếp tục được phát triển cho WMR chịu nhiễu nhằm đảm bảo thời gian hội tụ được xác định trước [88]. Bên cạnh đó, điều khiển thích nghi là một hướng tiếp cận quan trọng nhằm xử lý các tham số không biết hoặc thay đổi theo thời gian trong mô hình hệ thống. Các luật cập nhật tham số được xây dựng dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov, cho phép hệ thống tự điều chỉnh để duy trì hiệu năng điều khiển khi tồn tại sai lệch mô hình hoặc thay đổi điều kiện vận hành [7], [23]. Trong lĩnh vực robot di động, điều khiển thích nghi thường được kết hợp với các phương pháp phi tuyến khác để tăng cường khả năng chống nhiễu và bù bất định [10], [43].

Trong trường hợp mô hình động học và động lực học của hệ thống không thể được xác định chính xác, các phương pháp điều khiển thông minh dựa trên logic mờ và mạng nơ-ron nhân tạo đã được đề xuất như những giải pháp thay thế hiệu quả. Điều khiển mờ cho phép mô tả hành vi hệ thống thông qua các luật ngôn ngữ, trong khi mạng nơ-ron tận dụng khả năng xấp xỉ hàm phi tuyến để ước lượng sai lệch mô hình và nhiễu động học theo thời gian thực [44], [45], [46]. Khi được kết hợp với điều khiển trượt hoặc điều khiển thích nghi, các phương pháp này có thể cải thiện đáng kể tính linh hoạt và hiệu năng điều khiển trong môi trường có bất định cao [23], [46].

Gần đây, các phương pháp điều khiển tối ưu và học máy cũng được quan tâm trong điều khiển NWMR. Điều khiển dự đoán mô hình (MPC) cho phép xử lý các ràng buộc đầu vào – đầu ra và tối ưu hóa quỹ đạo trong khoảng thời gian hữu hạn [36], [47], trong khi các phương pháp học tăng cường, đặc biệt là học sâu tăng cường, mở ra khả năng tự học chính sách điều khiển mà không cần mô hình chính xác của hệ thống [48]. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn đối mặt với thách thức lớn trong việc đảm bảo tính ổn định, khả năng giải thích và độ tin cậy khi triển khai trên các hệ robot thực.

Mặc dù các phương pháp điều khiển phi tuyến hiện đại đã đạt được nhiều tiến bộ trong việc xử lý phi tuyến và bất định của NWMR, phần lớn các chiến lược này vẫn giả định rằng các biến trạng thái của hệ thống được đo đầy đủ và chính xác. Trong khi đó, trên thực tế, nhiều biến quan trọng như vận tốc bánh xe hoặc mô-men truyền động không thể đo trực tiếp. Do đó, việc kết hợp các bộ quan sát trạng thái với các bộ điều khiển phi tuyến trở thành yêu cầu tất yếu [16], [29], [49], [50], đồng thời mở đường cho các kiến trúc điều khiển–quan sát tích hợp chịu lỗi [13], [26].

1.2.3. Các kỹ thuật học và điều khiển dự báo trong robot di động

Trong những năm gần đây, bên cạnh các phương pháp điều khiển phi tuyến dựa trên mô hình, các kỹ thuật học, kỹ thuật dự báo và điều khiển dựa trên dữ liệu đã được quan tâm mạnh trong điều khiển robot di động. Xu hướng này xuất phát từ thực tế rằng robot tự hành thường làm việc trong môi trường có nhiều bất định, điều kiện bám mặt thay đổi, nhiễu ngoài, sai lệch tham số và các yếu tố khó mô hình hóa đầy đủ bằng các phương pháp giải tích truyền thống. Do đó, các phương pháp có khả năng học, xấp xỉ, dự báo hoặc thích nghi từ dữ liệu được xem là một hướng phát triển quan trọng nhằm nâng cao tính linh hoạt và khả năng tự chủ của robot di động.

Một trong những hướng tiếp cận phổ biến là sử dụng logic mờ và mạng nơ-ron nhân tạo trong điều khiển bám quỹ đạo. Điều khiển mờ cho phép mô tả kinh nghiệm điều khiển thông qua các luật ngôn ngữ, nhờ đó có thể xử lý các trường hợp mô hình hệ thống không hoàn toàn chính xác. Trong khi đó, mạng nơ-ron có khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến chưa biết, thường được sử dụng để ước lượng bất định mô hình, nhiễu động học hoặc thành phần sai lệch chưa được mô hình hóa. Các công trình như [44]–[46] cho thấy khi kết hợp logic mờ hoặc mạng nơ-ron với điều khiển thích nghi, điều khiển trượt hoặc backstepping, chất lượng bám quỹ đạo và khả năng chống nhiễu của robot di động có thể được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên, các phương pháp này thường yêu cầu lựa chọn cấu trúc mạng, luật cập nhật và tham số học phù hợp; đồng thời việc chứng minh ổn định và đảm bảo hiệu năng trong điều kiện lỗi cơ cấu chấp hành vẫn là một vấn đề cần được xem xét thận trọng.

Một hướng nghiên cứu khác là điều khiển dự báo mô hình, hay Model Predictive Control – MPC. Khác với các bộ điều khiển phản hồi tức thời, MPC sử dụng mô hình của hệ thống để dự báo trạng thái tương lai trong một khoảng thời gian hữu hạn, sau đó giải bài toán tối ưu có xét đến ràng buộc đầu vào, ràng buộc trạng thái và tiêu chuẩn bám quỹ đạo. Đối với robot di động, MPC có ưu điểm nổi bật là có thể xử lý trực tiếp các giới hạn vật lý của cơ cấu chấp hành, vận tốc, gia tốc và sai số bám. Các nghiên cứu gần đây như [36], [47], [49] đã cho thấy việc kết hợp MPC với bộ quan sát nhiễu hoặc bộ quan sát trượt có thể nâng cao chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện có nhiễu và bất định. Tuy nhiên, MPC thường phụ thuộc vào độ chính xác của mô hình dự báo và yêu cầu giải bài toán tối ưu theo thời gian thực, do đó chi phí tính toán có thể cao khi robot có động học phi tuyến, thời gian lấy mẫu nhỏ hoặc tồn tại nhiều ràng buộc.

Gần đây, học tăng cường và học sâu tăng cường cũng được áp dụng trong điều khiển robot di động, đặc biệt trong các bài toán mà mô hình chính xác khó xây dựng hoặc môi trường vận hành thay đổi theo thời gian. Thông qua cơ chế tương tác thử-sai với môi trường, học tăng cường có thể học chính sách điều khiển nhằm cực tiểu

hóa sai số bám hoặc tối ưu hóa một hàm thường xác định trước. Công trình [48] sử dụng chiến lược điều khiển lai có tích hợp học sâu tăng cường cho NWMR, cho thấy tiềm năng của các phương pháp học trong việc cải thiện khả năng thích nghi và tự học chính sách điều khiển. Tuy nhiên, các phương pháp học tăng cường thường cần lượng dữ liệu huấn luyện lớn, khó đảm bảo tính an toàn trong giai đoạn học, và việc chứng minh ổn định theo nghĩa Lyapunov hoặc đảm bảo độ tin cậy khi triển khai trên hệ thực vẫn còn là thách thức đáng kể.

Bên cạnh đó, các hướng điều khiển dựa trên dữ liệu và điều khiển không mô hình hóa tường minh cũng đang được quan tâm trong các hệ robot tự hành. Các phương pháp này không yêu cầu mô hình toán học đầy đủ của hệ thống mà khai thác dữ liệu vào-ra để xây dựng luật điều khiển hoặc cập nhật trực tuyến tham số điều khiển [71], [72]. Đối với robot di động, hướng tiếp cận này có tiềm năng trong các trường hợp mô hình động học và động lực học thay đổi do tải trọng, trượt bánh, suy giảm hiệu suất cơ cấu chấp hành hoặc điều kiện mặt nền. Tuy vậy, khi xét đến bài toán điều khiển chịu lỗi, các phương pháp dựa trên dữ liệu thường chưa cung cấp được thông tin lỗi cơ cấu chấp hành một cách tường minh, do đó việc tích hợp với bộ quan sát lỗi hoặc cơ chế chẩn đoán vẫn là một hướng cần tiếp tục nghiên cứu.

1.2.4. Điều khiển chịu lỗi và xu hướng nghiên cứu

Các phương pháp FTC cho NWMR thường được phân thành hai nhóm chính: điều khiển chịu lỗi thụ động (PFTC) và điều khiển chịu lỗi chủ động (AFTC) [6], [7]. Trong các tiếp cận PFTC, bộ điều khiển được thiết kế với độ bền vững đủ lớn để duy trì ổn định và hiệu năng chấp nhận được khi tồn tại một mức độ lỗi hoặc sai lệch tham số nhất định, mà không cần phát hiện hay tái cấu trúc điều khiển. Trong bối cảnh robot di động, lỗi cơ cấu chấp hành thường được xem như một dạng nhiễu giới hạn và được xử lý gián tiếp thông qua các kỹ thuật điều khiển bền vững như điều khiển H_∞ , điều khiển trượt bền vững hoặc các biến thể điều khiển thích nghi [21], [35], [43]. Tuy nhiên, do không khai thác thông tin lỗi một cách tường minh, các phương pháp PFTC thường cho hiệu năng hạn chế và khó thích ứng khi lỗi có biên độ lớn hoặc biến thiên theo thời gian [7], [8].

Ngược lại, các chiến lược AFTC tích hợp cơ chế phát hiện, chẩn đoán và bù lỗi trong thời gian thực, cho phép hệ thống điều chỉnh hoặc tái cấu trúc luật điều khiển nhằm duy trì hiệu năng mong muốn khi lỗi xảy ra. Đối với NWMR, các nghiên cứu trong nước và quốc tế đã tập trung phát triển các cấu trúc AFTC dựa trên bộ quan sát phi tuyến, trong đó lỗi cơ cấu chấp hành được ước lượng thông qua tín hiệu dư sinh ra từ sai lệch giữa mô hình và hệ thực [8], [9], [12]. Các cấu trúc thường gặp bao gồm SMO [17], UIO [18], DO [19], [50] và ESO [29], [51]. Khi được kết hợp với các bộ

điều khiển phi tuyến như điều khiển trượt, điều khiển thích nghi hoặc backstepping, các cấu trúc này cho phép cải thiện đáng kể khả năng bù lỗi và độ bền vững của hệ thống [10], [32], [52].

Trong các công trình nghiên cứu gần đây, xu hướng FTC cho NWMR tập trung vào việc tích hợp chặt chẽ giữa bộ quan sát và bộ điều khiển nhằm nâng cao độ chính xác ước lượng và hiệu quả bù lỗi trong môi trường có bất định cao [13], [26], [27]. Một số hướng tiếp cận tiêu biểu bao gồm việc sử dụng ESO để ước lượng nhiễu tổng hợp và ảnh hưởng của trượt/skidding [29], các chiến lược FTC thích nghi phi tuyến cho phép cập nhật tham số lỗi theo thời gian [8], [53], cũng như việc kết hợp điều khiển trượt bậc cao với logic mờ hoặc mạng nơ-ron để xử lý các dạng lỗi phi tuyến phức tạp trong các hệ robot phi tuyến [32], [54]. Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây cũng mở rộng FTC cho các hệ robot di động đa tác tử, trong đó thông tin từ các robot lân cận được khai thác nhằm nâng cao khả năng phát hiện và bù lỗi trong kiến trúc phân tán [31].

Mặc dù đã đạt được nhiều kết quả quan trọng, các phương pháp FTC hiện có cho NWMR vẫn đối mặt với nhiều thách thức. Thứ nhất, việc phân tách rõ ràng giữa lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu chưa biết trong các hệ phi tuyến vẫn còn hạn chế, đặc biệt khi cả hai cùng tác động lên động lực học của hệ [11], [29]. Thứ hai, phần lớn các cấu trúc AFTC cho robot di động với kiến trúc phân tầng động học, động lực học tích hợp quan sát còn chưa được khai thác đầy đủ [26], [36]. Thứ ba, mặc dù một số nghiên cứu đã đề cập đến hội tụ hữu hạn thời gian hoặc cố định thời gian trong điều khiển chịu lỗi [32], [33], việc đảm bảo đồng thời tốc độ hội tụ, chất lượng quá độ và hiệu năng bám quỹ đạo định trước trong bài toán điều khiển chịu lỗi cho NWMR vẫn còn nhiều hạn chế [29], [53].

Do đó, xu hướng nghiên cứu hiện nay hướng tới việc phát triển các cấu trúc điều khiển chịu lỗi tích hợp, trong đó bộ quan sát không chỉ cung cấp thông tin trạng thái mà còn hỗ trợ phát hiện và ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành theo thời gian thực, làm cơ sở cho việc bù lỗi và tái cấu trúc điều khiển một cách có hệ thống [6], [7], [13].

1.3. Các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi

1.3.1. Vai trò của bộ quan sát trong hệ thống NWMR

Trong các hệ NWMR, khả năng đo lường trực tiếp các biến trạng thái thường bị giới hạn bởi cấu hình phần cứng và chi phí cảm biến. Nhiều đại lượng quan trọng như vận tốc thực của bánh xe, mô-men truyền động, lực tương tác bánh–mặt nền hoặc nhiễu tổng hợp không thể thu nhận trực tiếp từ hệ thống đo, dẫn đến sự thiếu hụt thông tin trạng thái cần thiết cho giám sát và điều khiển [1], [3], [30]. Điều này đặc

biệt rõ rệt trong các hệ robot làm việc trong môi trường có trượt bánh hoặc bất định động lực học, nơi sai lệch giữa mô hình danh định và hệ thực có thể tăng lên đáng kể [3], [55].

Bộ quan sát trạng thái được sử dụng như một công cụ ước lượng nhằm tái tạo các biến không đo được từ tín hiệu đầu vào – đầu ra và mô hình danh định của hệ thống. Về mặt lý thuyết, các bộ quan sát tuyến tính như Luenberger observer [14] và bộ lọc Kalman [15], [56] đặt nền tảng cho việc ước lượng trạng thái trong các hệ động lực. Trên cơ sở đó, nhiều cấu trúc quan sát phi tuyến cũng đã được áp dụng và phát triển trên NWMR bao gồm HiGO, DO và các bộ quan sát dựa trên mô hình [13], [28]. Thông tin trạng thái ước lượng này cho phép các khối chức năng phía trên, bao gồm điều khiển và giám sát, hoạt động trong điều kiện thiếu đo lường trực tiếp mà không làm gián đoạn quá trình vận hành của robot [27]. Ngoài việc cung cấp ước lượng trạng thái, bộ quan sát còn cho phép xây dựng các tín hiệu sai lệch giữa hành vi thực tế của hệ thống và hành vi dự đoán theo mô hình danh định. Các tín hiệu này, thường được gọi là tín hiệu dư (residual), đóng vai trò là nguồn thông tin quan trọng để giám sát tình trạng vận hành của hệ thống và phát hiện các sai lệch bất thường trong quá trình hoạt động [6], [37]. Trong lý thuyết chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình, residual là cơ sở để phát hiện và cô lập lỗi, đặc biệt trong các hệ có đầu vào chưa biết hoặc tồn tại bất định mô hình [4], [18], [57].

Trong robot tự hành hiện đại, bộ quan sát không được xem là một thành phần điều khiển độc lập mà là một khối xử lý thông tin, cung cấp dữ liệu đầu vào cho các chiến lược điều khiển và chẩn đoán ở các mức cao hơn [6], [26]. Các nghiên cứu gần đây về điều khiển bám quỹ đạo dựa trên quan sát cho robot di động cho thấy hiệu năng của hệ thống phụ thuộc mạnh vào chất lượng ước lượng trạng thái và khả năng bù nhiễu của bộ quan sát [13], [29], [49]. Việc lựa chọn cấu trúc bộ quan sát phù hợp có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của ước lượng trạng thái và độ nhạy của tín hiệu dư, từ đó tác động đến hiệu quả của các hệ thống giám sát và phát hiện lỗi [16], [37]. Do đó, nghiên cứu các phương pháp quan sát trạng thái và phát hiện sai lệch dựa trên mô hình là bước nền quan trọng trong việc xây dựng các kiến trúc điều khiển và giám sát tiên tiến cho NWMR [4], [13], [37].

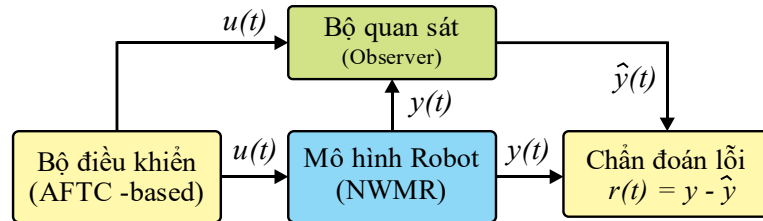
1.3.2. Tổng quan các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi dựa trên mô hình

Các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi dựa trên mô hình là một trong những hướng tiếp cận được sử dụng rộng rãi trong các hệ robot tự hành, nhờ khả năng khai thác trực tiếp cấu trúc động học và động lực học của hệ thống. Ý tưởng cốt lõi của các phương pháp này là xây dựng một mô hình danh định của hệ thống và sử

dụng bộ quan sát để ước lượng trạng thái hoặc đầu ra lý tưởng, từ đó so sánh với tín hiệu đo thực tế nhằm phát hiện các sai lệch bất thường [6], [37].

Trong các hệ thống tuyến tính hoặc các hệ có mức độ phi tuyến thấp, các bộ quan sát cổ điển như Luenberger observer và các bộ lọc Kalman được sử dụng phổ biến để ước lượng trạng thái và phát hiện các sai lệch nhỏ trong cảm biến hoặc mô hình. Các phương pháp này có ưu điểm là cấu trúc rõ ràng, cơ sở lý thuyết vững chắc và dễ triển khai. Tuy nhiên, khi áp dụng cho các hệ NWMR với động học phi tuyến và ràng buộc non-holonomic, hiệu quả của các bộ quan sát tuyến tính thường bị suy giảm, đặc biệt trong điều kiện bất định mô hình hoặc nhiễu chưa biết [1], [3], [28]. Để khắc phục các hạn chế này, nhiều bộ quan sát phi tuyến đã được phát triển nhằm nâng cao khả năng hội tụ và độ bền vững của quá trình ước lượng. Các hướng tiếp cận tiêu biểu bao gồm HiGO, SMO, UIO, ESO [16]-[19], [29], [57]-[59]. Các bộ quan sát này cho phép xử lý tốt hơn các bất định mô hình, nhiễu chưa biết và sai lệch đầu vào, đồng thời tạo ra các tín hiệu dư có độ nhạy cao đối với lỗi [18], [37].

Trên cơ sở các bộ quan sát trạng thái, các phương pháp phát hiện và chẩn đoán lỗi (FDD) dựa trên mô hình thường sử dụng tín hiệu dư làm chỉ báo cho sự xuất hiện của lỗi. Khi hệ thống hoạt động bình thường, tín hiệu dư duy trì trong một miền giới hạn xác định bởi nhiễu và sai số mô hình. Sự xuất hiện của lỗi sẽ làm thay đổi đặc tính của tín hiệu dư về biên độ, hướng hoặc động học, từ đó cho phép phát hiện và phân loại lỗi thông qua các cơ chế đánh giá ngưỡng hoặc phân tích thống kê [37], [57]. Đối với NWMR, các phương pháp observer-based FDD đặc biệt phù hợp do khả năng khai thác cấu trúc động học của hệ thống và không yêu cầu phần cứng cảm biến bổ sung. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng việc sử dụng các bộ quan sát phi tuyến giúp cải thiện đáng kể tốc độ phát hiện và độ tin cậy của quá trình chẩn đoán lỗi trong điều kiện bất định và nhiễu cao. Tuy nhiên, hiệu quả của các phương pháp này vẫn phụ thuộc mạnh vào chất lượng mô hình danh định và khả năng phân tách giữa ảnh hưởng của lỗi và nhiễu chưa biết.



Hình 1.3. Sơ đồ nguyên lý phát hiện lỗi dựa trên bộ quan sát

Nhìn chung, các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi dựa trên mô hình đã tạo nền tảng quan trọng cho việc giám sát và chẩn đoán trạng thái vận hành của NWMR. Tuy nhiên, việc thiết kế các bộ quan sát có khả năng ước lượng chính xác trạng thái và lỗi trong điều kiện phi tuyến và bất định vẫn là một thách thức.

1.4. Các hướng nghiên cứu kết hợp bộ quan sát – điều khiển chịu lỗi trong hệ thống NWMR

1.4.1. Kiến trúc tích hợp bộ quan sát và điều khiển cho NWMR

Việc thiết kế bộ điều khiển dựa hoàn toàn trên tín hiệu đo trực tiếp thường gặp nhiều hạn chế do thiếu cảm biến, nhiễu đo và sai số mô hình. Nhiều biến trạng thái quan trọng như vận tốc, các thành phần nhiễu, trượt bánh xe hoặc sai lệch thực thi của cơ cấu chấp hành không thể đo trực tiếp trong quá trình vận hành thực tế [28], [55]. Vì vậy, việc kết hợp bộ quan sát và bộ điều khiển trong cùng một kiến trúc phản hồi đã trở thành một hướng tiếp cận chủ đạo trong nghiên cứu điều khiển robot di động [13], [26]. Các nghiên cứu gần đây tiếp tục mở rộng hướng này thông qua việc tích hợp bộ quan sát trạng thái mở rộng với thời gian hội tụ định trước vào điều khiển dự báo [89], đồng thời kết hợp kiến trúc quan sát phân tầng với điều khiển trượt có ràng buộc hiệu năng định trước cho robot di động [90]. Tùy theo mục tiêu ước lượng và cách sử dụng thông tin từ bộ quan sát, có thể phân nhóm các hướng tiếp cận chính như sau.

a) Điều khiển phản hồi dựa trên trạng thái ước lượng

Trong hướng tiếp cận này, bộ quan sát được sử dụng để ước lượng các trạng thái không đo được và các giá trị ước lượng này được sử dụng trực tiếp trong luật điều khiển phản hồi. Cách tiếp cận này cho phép triển khai các bộ điều khiển phản hồi trạng thái như backstepping [20], điều khiển trượt [21], [22] hoặc điều khiển thích nghi [23], [60] trong điều kiện thiếu đo lường trực tiếp, nhờ đó mở rộng phạm vi ứng dụng của điều khiển phản hồi trạng thái đối với robot di động. Nhiều nghiên cứu đã áp dụng các bộ quan sát trạng thái, bộ quan sát độ lợi cao hoặc bộ lọc Kalman để cải thiện chất lượng ước lượng và nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo của robot di động [13], [14], [16]. Tuy nhiên, hiệu năng của các phương pháp này phụ thuộc mạnh vào độ chính xác của mô hình danh định và thường nhạy cảm với nhiễu đo khi tăng tốc độ hội tụ của bộ quan sát [16], [58].

b) Điều khiển bền vững dựa trên quan sát nhiễu và bất định

Một hướng phát triển quan trọng là tích hợp các bộ quan sát nhằm ước lượng nhiễu tổng hợp hoặc phân động lực học chưa được mô hình hóa để thực hiện bù theo thời gian thực. Các bộ quan sát nhiễu (DO, ESO) đã được sử dụng rộng rãi trong điều khiển robot di động nhằm tăng cường tính bền vững trước nhiễu ngoài, sai lệch tham số và hiện tượng trượt bánh [19], [29]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc kết hợp ESO với điều khiển trượt, điều khiển thích nghi hoặc điều khiển khử nhiễu chủ động (ADRC) có thể cải thiện đáng kể chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện bất định [29], [30], [36]. Tuy nhiên, trong các công trình này, lỗi cơ cấu chấp hành thường

được gộp vào nhiều tổng hợp, dẫn đến hạn chế trong việc phát hiện và xử lý lỗi một cách tường minh.

c) Điều khiển dựa trên quan sát đầu vào chưa biết và tách ảnh hưởng lỗi

Các bộ quan sát UIO, SMO đã được phát triển nhằm tách ảnh hưởng của các tác động này khỏi quá trình ước lượng trạng thái [17], [18]. Hướng tiếp cận này đóng vai trò quan trọng trong các hệ điều khiển chịu lỗi chủ động, cho phép kết hợp giữa quan sát lỗi và luật điều khiển bù lỗi theo thời gian thực [6], [9]. Tuy nhiên, việc thiết kế các bộ quan sát dạng này thường đòi hỏi các điều kiện cấu trúc nghiêm ngặt để đảm bảo khả năng quan sát và khả năng tách, khiến phạm vi áp dụng bị hạn chế đối với các hệ phi tuyến như NWMR nếu áp dụng không đúng cách [57].

d) Điều khiển phi tuyến kết hợp quan sát hội tụ hữu hạn thời gian

Gần đây, nhiều nghiên cứu tập trung vào việc nâng cao tốc độ hội tụ và chất lượng quá độ của hệ thống thông qua việc kết hợp các bộ quan sát phi tuyến với các bộ điều khiển hội tụ hữu hạn thời gian (finite-time) hoặc cố định thời gian (fixed-time) [24], [32], [33], [41], [42]. Các phương pháp này đảm bảo sai số bám quỹ đạo hội tụ về không trong một khoảng thời gian hữu hạn hoặc bị chặn bởi một hằng số thời gian độc lập với điều kiện ban đầu, qua đó cải thiện đáng kể tốc độ đáp ứng và khả năng phục hồi của hệ thống khi chịu tác động của nhiễu và bất định. Việc kết hợp điều khiển trượt hữu hạn thời gian với bộ quan sát nhiễu hoặc bộ quan sát trạng thái mở rộng đã được chứng minh là nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo và tăng cường tính bền vững của hệ thống [27], [29]. Tuy nhiên, các công trình này chủ yếu tập trung vào việc đảm bảo tốc độ hội tụ hoặc tính bền vững, mà chưa xem xét một cách tường minh việc ràng buộc hành vi quá độ của sai số theo các giới hạn định trước trong suốt quá trình vận hành.

Cụ thể, mặc dù các phương pháp finite-time và fixed-time cho phép đảm bảo hội tụ nhanh, chúng không trực tiếp kiểm soát miền biến thiên của sai số trong giai đoạn quá độ, chẳng hạn như giới hạn độ quá điều chỉnh (overshoot) hoặc tốc độ suy giảm sai số theo một biên dạng mong muốn. Do đó, việc tích hợp đồng thời cơ chế đảm bảo hội tụ hữu hạn thời gian với các yêu cầu ràng buộc hiệu năng theo thời gian vẫn còn là một hướng nghiên cứu mở trong điều khiển NWMR.

Nhận xét: Qua các hướng tiếp cận nêu trên có thể nhận thấy rằng, mặc dù việc kết hợp bộ quan sát và bộ điều khiển đã đạt được nhiều kết quả quan trọng trong điều khiển robot di động, phần lớn các công trình hiện có vẫn tập trung xử lý từng loại bất định hoặc từng khía cạnh riêng lẻ của hệ thống. Một số nghiên cứu nhấn mạnh khả năng bù nhiễu và bất định thông qua bộ quan sát, trong khi các nghiên cứu khác tập trung vào việc đảm bảo hội tụ hữu hạn thời gian hoặc cố định thời gian của sai số

bám quỹ đạo. Tuy nhiên, các yêu cầu này thường được xem xét tách biệt và chưa được tích hợp đồng thời trong một khung thiết kế thống nhất.

Đặc biệt, mặc dù điều khiển hội tụ hữu hạn thời gian cho phép cải thiện đáng kể tốc độ đáp ứng và khả năng phục hồi của hệ thống, phần lớn các công trình chưa xem xét một cách tường minh các ràng buộc hiệu năng trong suốt quá trình quá độ, chẳng hạn như giới hạn biên độ sai số, tốc độ suy giảm mong muốn hoặc miền biến thiên cho phép của sai số bám quỹ đạo. Do đó, việc đảm bảo đồng thời tốc độ hội tụ nhanh và duy trì hành vi quá độ nằm trong các giới hạn định trước vẫn còn là một thách thức trong điều khiển NWMR.

Bên cạnh đó, việc thiếu một kiến trúc tích hợp có tổ chức, cho phép phối hợp nhiều bộ quan sát phục vụ các mục tiêu khác nhau (ước lượng trạng thái, nhiễu, lỗi cơ cấu chấp hành) và khai thác thông tin lỗi một cách tường minh trong luật điều khiển, đặc biệt đối với NWMR chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiễu, trượt bánh xe và lỗi cơ cấu chấp hành, vẫn là một hạn chế mang tính hệ thống.

Những nhận xét trên cho thấy sự cần thiết của việc phát triển một kiến trúc điều khiển–quan sát tích hợp, trong đó các cơ chế ước lượng và bù lỗi được tổ chức theo cấu trúc rõ ràng, hoặc kết hợp yêu cầu hội tụ hữu hạn thời gian với các ràng buộc hiệu năng định trước nhằm nâng cao độ tin cậy và chất lượng bám quỹ đạo của hệ thống.

1.4.2. Điều khiển chịu lỗi dựa trên kiến trúc quan sát–điều khiển cho NWMR

Dựa trên cách thức xử lý lỗi và mức độ khai thác thông tin quan sát, các hướng tiếp cận điều khiển chịu lỗi cho robot di động có thể được phân loại thành các nhóm chính sau.

a) Điều khiển chịu lỗi thụ động cho robot di động

Trong các kiến trúc điều khiển chịu lỗi thụ động, lỗi cơ cấu chấp hành được xem như một dạng bất định hoặc nhiễu không xác định và được xử lý gián tiếp thông qua các bộ điều khiển bền vững. Các phương pháp điều khiển trượt, điều khiển thích nghi hoặc điều khiển bền vững H_∞ đã được sử dụng rộng rãi nhằm duy trì ổn định và đảm bảo chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện tồn tại lỗi [21], [23], [35], [43].

Ưu điểm của các phương pháp này là cấu trúc điều khiển tương đối đơn giản và không yêu cầu khối chẩn đoán lỗi riêng biệt. Tuy nhiên, do không sử dụng thông tin lỗi một cách tường minh, khả năng bù lỗi thường bị hạn chế, đặc biệt khi xảy ra các lỗi nghiêm trọng hoặc lỗi biến thiên theo thời gian [7], [8]. Hơn nữa, các phương pháp này khó đảm bảo hiệu năng quá độ trong các tình huống lỗi đột ngột [32], [33].

b) Điều khiển chịu lỗi chủ động dựa trên bộ quan sát

Để nâng cao khả năng xử lý lỗi, nhiều nghiên cứu đã phát triển các chiến lược điều khiển chịu lỗi chủ động cho robot di động, trong đó các bộ quan sát được tích hợp nhằm hỗ trợ bù lỗi theo thời gian thực [6], [8], [9]. Gần đây, Zhang và Chai [85] đã phát triển chiến lược điều khiển chịu lỗi cho robot di động có bánh với yêu cầu chất lượng bám quỹ đạo định trước, cho thấy xu hướng kết hợp đồng thời bù lỗi cơ cấu chấp hành và ràng buộc hiệu năng bám quỹ đạo. Cách tiếp cận phổ biến là xem ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành như một phần của trạng thái mở rộng hoặc nhiều tổng hợp, sau đó sử dụng các bộ quan sát trạng thái, bộ quan sát nhiễu hoặc bộ quan sát trạng thái mở rộng để gián tiếp xử lý lỗi trong luật điều khiển [11], [16], [19], [29].

Các phương pháp này đã cho thấy hiệu quả nhất định trong việc cải thiện chất lượng bám quỹ đạo của robot di động dưới tác động của lỗi cơ cấu chấp hành và các bất định khác [8], [9], [12]. Tuy nhiên, do không tách riêng lỗi cơ cấu chấp hành như một đại lượng cần được quan sát độc lập, thông tin thu được từ bộ quan sát thường mang tính gián tiếp và phụ thuộc mạnh vào mô hình danh định cũng như các giả thiết về cấu trúc bất định [11], [29]. Điều này đặc biệt gây khó khăn đối với NWMR, nơi tồn tại đồng thời ràng buộc động học, nhiễu và trượt bánh xe [3], [55].

c) Xu hướng phát triển trong điều khiển chịu lỗi cho robot di động

Gần đây, các nghiên cứu về điều khiển robot di động cho thấy xu hướng rõ rệt theo hai hướng phát triển chính. Thứ nhất, các kiến trúc điều khiển phân tầng ngày càng được quan tâm nhằm tách biệt bài toán điều khiển động học và điều khiển động lực học, qua đó đơn giản hóa thiết kế và nâng cao hiệu năng bám quỹ đạo [36], [38]. Các cấu trúc điều khiển hai vòng cho robot di động đã được đề cập trong một số công trình gần đây [13], [26]. Tuy nhiên, vai trò của các bộ quan sát trong từng tầng điều khiển vẫn chưa được phân công rõ ràng, đặc biệt trong bối cảnh điều khiển chịu lỗi [8], [26]. Thứ hai, các yêu cầu về tốc độ hội tụ và chất lượng quá độ ngày càng được chú trọng. Nhiều công trình đã nghiên cứu các bộ điều khiển hội tụ hữu hạn thời gian hoặc cố định thời gian nhằm cải thiện khả năng phục hồi sau nhiễu và bất định [24], [32], [33], [41], [42]. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu điều khiển chịu lỗi cho robot di động, các yêu cầu về hội tụ nhanh và ràng buộc hành vi quá độ thường ít được đề cập hoặc chỉ được xem xét riêng lẻ, chưa được tích hợp đồng thời trong một kiến trúc điều khiển–quan sát thống nhất.

Mặc dù các xu hướng trên đã đạt được những kết quả đáng chú ý, việc tích hợp có hệ thống giữa kiến trúc điều khiển phân tầng, cơ chế quan sát hỗ trợ điều khiển chịu lỗi và các yêu cầu hội tụ nhanh trong một khung thống nhất cho NWMR vẫn còn hạn chế [8], [26], [29].

1.4.3. Tình hình nghiên cứu trong nước về điều khiển robot di động và những vấn đề còn tồn tại

Ở Việt Nam, bài toán điều khiển robot di động đã được quan tâm theo nhiều hướng, trong đó nổi bật là điều khiển bám quỹ đạo khi hệ thống chịu ảnh hưởng của trượt bánh, nhiễu ngoài, bất định mô hình và giới hạn của cơ cấu chấp hành. Các nghiên cứu này đã hình thành nền tảng quan trọng cho việc phát triển các phương pháp điều khiển bền vững và thích nghi cho robot di động trong điều kiện vận hành không lý tưởng.

Một hướng nghiên cứu tiêu biểu tập trung vào bù ảnh hưởng của trượt bánh bằng các phương pháp điều khiển thích nghi kết hợp mạng nơ-ron. Trong [75], bộ điều khiển thích nghi dựa trên mạng nơ-ron được xây dựng cho NWMR khi các tham số trượt bánh không biết. Công trình [76] nghiên cứu có hệ thống các thuật toán điều khiển robot di động có xét đến ảnh hưởng của trượt bánh, làm rõ vai trò của sai lệch động học bánh–mặt nền đối với chất lượng bám quỹ đạo. Trên cơ sở đó, phương pháp trong [77] tiếp tục xem xét đồng thời trượt bánh chưa biết, bất định mô hình và nhiễu ngoài bị chặn. Các kết quả này cho thấy mạng nơ-ron và cơ chế thích nghi có khả năng xấp xỉ các thành phần bất định và cải thiện chất lượng bám quỹ đạo. Tuy nhiên, trượt bánh và các sai lệch mô hình chủ yếu được xử lý dưới dạng bất định tổng hợp, chưa được phân tách khỏi lỗi cơ cấu chấp hành.

Theo hướng điều khiển thích nghi bền vững, công trình [78] kết hợp backstepping với luật thích nghi để bù trượt bánh chưa biết và xét đến hiện tượng bão hòa cơ cấu chấp hành. Công trình [79] xây dựng bộ điều khiển thích nghi bền vững cho robot di động khi đồng thời tồn tại nhiễu và trượt bánh. Trong [80], bộ điều khiển mờ thích nghi loại 2 được sử dụng nhằm nâng cao khả năng xử lý bất định, nhiễu và sai lệch do trượt bánh. Gần đây, công trình [84] kết hợp điều khiển trượt với mạng nơ-ron để xử lý bất định mô hình, nhiễu ngoài và trượt bánh cho robot di động vi sai hai bánh. Các phương pháp trên cải thiện đáng kể tính bền vững của hệ thống, nhưng chủ yếu thực hiện bù gián tiếp các tác động chưa biết mà chưa tái tạo tường minh lỗi cơ cấu chấp hành.

Một số nghiên cứu khác tập trung phát triển các cấu trúc điều khiển trượt và điều khiển thông minh cho những cấu hình robot khác nhau. Công trình [81] nghiên cứu điều khiển trượt cho bài toán bám quỹ đạo của robot di động. Trong [82], mặt trượt dạng PID được áp dụng cho robot di động đa hướng nhằm cải thiện đáp ứng bám. Công trình [83] sử dụng mạng nơ-ron để bù ảnh hưởng của bất định tham số và nhiễu trong điều khiển chuyển động robot di động. Các kết quả này góp phần mở rộng khả năng ứng dụng của điều khiển phi tuyến và điều khiển thông minh; tuy

nhien, một số đối tượng như robot đa hướng không có cùng ràng buộc động học với NWMR kiểu truyền động vi sai với hai bánh chủ động được xem xét trong luận án.

Từ các kết quả trên có thể nhận thấy rằng nghiên cứu trong nước đã đạt được những tiến bộ đáng kể về điều khiển bám quỹ đạo bền vững cho robot di động. Các phương pháp điều khiển thích nghi, điều khiển trượt, logic mờ và mạng nơ-ron đã được khai thác để xử lý trượt bánh, nhiễu ngoài, bất định mô hình và bão hòa cơ cấu chấp hành. Đây là những yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác và tính ổn định của robot trong điều kiện vận hành thực tế.

Tuy nhiên, trong phạm vi các tài liệu được khảo sát, vẫn còn một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu. Thứ nhất, trượt bánh, nhiễu và bất định mô hình thường được gộp thành một thành phần chưa biết và được bù bằng tính bền vững của bộ điều khiển; trong khi lỗi cơ cấu chấp hành chưa được mô hình hóa, phát hiện và tái tạo như một đại lượng độc lập. Thứ hai, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào điều khiển chịu lỗi theo hướng thụ động hoặc bù bất định, chưa khai thác đầy đủ thông tin lỗi ước lượng để thực hiện bù lỗi chủ động. Thứ ba, sự phối hợp giữa bộ quan sát trạng thái, bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển trong một kiến trúc phân tầng hoặc hai vòng chưa được thể hiện rõ. Thứ tư, yêu cầu về tốc độ hội tụ và ràng buộc hành vi quá độ của sai số bám thường chưa được xem xét đồng thời với bài toán chịu lỗi.

Bảng 1.2. So sánh một số nghiên cứu liên quan trực tiếp về điều khiển NWMR

Tài liệu	Vấn đề nghiên cứu	Phương pháp chính	Kết quả đạt được	Vấn đề còn tồn tại
[8]–[12]	NWMR có lỗi cơ cấu chấp hành, sai lệch tham số và trượt bánh	Điều khiển thích nghi, mô hình đa mô hình, điều khiển chịu lỗi	Duy trì ổn định và cải thiện bám quỹ đạo khi cơ cấu chấp hành suy giảm	Một số phương pháp phụ thuộc mạnh vào mô hình hoặc tham số lỗi; thông tin lỗi chưa luôn được tái tạo tường minh
[13], [26], [27]	Điều khiển bám dựa trên quan sát khi trạng thái hoặc nhiễu không đo được	Bộ quan sát trạng thái kết hợp điều khiển phi tuyến, điều khiển hữu hạn thời gian	Giảm yêu cầu cảm biến và nâng cao chất lượng bám	Chủ yếu tập trung vào trạng thái hoặc nhiễu động học; chưa tổ chức đồng thời quan sát trạng thái, nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành
[28]–[30], [50], [51]	Trượt bánh, nhiễu gộp và bất định	ESO, bộ quan sát nhiễu, super-twisting SMC	Nâng cao tính bền vững và khả năng khử nhiễu	Lỗi cơ cấu chấp hành thường bị gộp vào nhiễu tổng, khó khai thác thông tin lỗi cho chẩn đoán và bù chủ động
[24], [32], [33], [41], [42]	Hội tụ hữu hạn hoặc cố định thời gian	Điều khiển trượt đầu cuối, FTC hữu hạn thời gian	Cải thiện tốc độ hội tụ và khả năng phục hồi	Chưa kiểm soát tường minh biên độ sai số và hành vi quá độ trong toàn bộ quá trình

[31], [35], [36]	FTC cho hệ robot nhiều cơ cấu chấp hành hoặc kiến trúc hai vòng	Điều khiển phối hợp, điều khiển dự thừa, ADRC-MPC	Nâng cao khả năng duy trì hoạt động khi có lỗi	Đối tượng hoặc cấu trúc truyền động khác NWMR hai bánh; vai trò bộ quan sát trong từng vòng chưa rõ
[75]– [77]	NWMR có trượt bánh, bất định mô hình và nhiễu	Điều khiển thích nghi, mạng nơ-ron	Ước lượng hoặc bù ảnh hưởng của trượt và cải thiện bám quỹ đạo	Chưa xem xét tường minh lỗi cơ cấu chấp hành và cơ chế tái tạo lỗi
[78]	WMR có trượt bánh và bão hòa cơ cấu chấp hành	Backstepping thích nghi bền vững	Xử lý đồng thời trượt bánh và giới hạn đầu vào	Bão hòa là ràng buộc vật lý, không phải cơ chế phát hiện và bù lỗi chủ động
[79], [80]	WMR có nhiễu và trượt bánh	Điều khiển thích nghi bền vững, logic mờ loại 2	Nâng cao tính bền vững trước bất định	Các tác động chưa biết được bù gộp, chưa phân tách lỗi cơ cấu chấp hành
[81], [82]	Robot di động và robot đa hướng	Điều khiển trượt, mặt trượt PID	Cải thiện đáp ứng và độ chính xác bám	Chưa tích hợp bộ quan sát lỗi; một số đối tượng không thuộc lớp NWMR hai bánh
[83], [84]	Robot di động có bất định tham số, nhiễu và trượt bánh	Mạng nơ-ron, điều khiển trượt thích nghi	Tăng khả năng thích nghi và chống nhiễu	Chưa hình thành kiến trúc điều khiển chịu lỗi chủ động dựa trên tín hiệu lỗi ước lượng

1.5. Khoảng trống nghiên cứu của luận án

Từ tổng quan các công trình nghiên cứu về điều khiển, quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR, có thể thấy rằng mặc dù đã có nhiều kết quả quan trọng, vẫn còn một số khoảng trống cần tiếp tục nghiên cứu.

Thứ nhất, nhiều phương pháp điều khiển phi tuyến như điều khiển trượt, điều khiển thích nghi và backstepping đã được áp dụng cho bài toán bám quỹ đạo NWMR [21], [23], [40], [43], [60]. Tuy nhiên, trong phần lớn các công trình này, lỗi cơ cấu chấp hành thường được xem như nhiễu hoặc bất định bị chặn, chưa được ước lượng và bù một cách tường minh trong luật điều khiển [7], [8].

Thứ hai, các chiến lược điều khiển chịu lỗi chủ động đã được phát triển dựa trên bộ quan sát, logic mờ, điều khiển thích nghi hoặc mô hình đa cấu trúc [6]–[9], [12]. Dù vậy, tín hiệu lỗi trong các phương pháp này thường được xử lý gián tiếp thông qua trạng thái mở rộng, nhiễu tổng hợp hoặc tham số thích nghi, thay vì xây dựng bộ quan sát lỗi chuyên biệt cho NWMR.

Thứ ba, các bộ quan sát trạng thái, bộ quan sát nhiễu và ESO đã được sử dụng để cải thiện chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện có nhiễu, bất định và trượt bánh [13], [19], [28], [29], [51]. Tuy nhiên, lỗi cơ cấu chấp hành thường chưa được tách

riêng như một đại lượng cần quan sát độc lập, làm hạn chế khả năng chẩn đoán và bù lỗi trực tiếp.

Thứ tư, các kiến trúc điều khiển phân tầng động học – động lực học đã cho thấy hiệu quả trong điều khiển NWMR [36], [38]. Tuy nhiên, việc tích hợp bộ quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi trong một cấu trúc phân tầng có tổ chức vẫn còn hạn chế, đặc biệt là vai trò của từng bộ quan sát trong từng tầng điều khiển chưa được làm rõ [8], [26], [52]. Mặc dù một số nghiên cứu gần đây đã bắt đầu khai thác điều khiển chịu lỗi với hiệu năng định trước, điều khiển dựa trên bộ quan sát với thời gian hội tụ định trước và kiến trúc quan sát phân tầng [85], [89], [90], việc phối hợp đồng thời quá trình ước lượng trạng thái, nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành trong một cấu trúc điều khiển phân tầng vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Ngoài ra, các kỹ thuật học, điều khiển dự báo và điều khiển dựa trên dữ liệu như logic mờ, mạng nơ-ron, MPC, học tăng cường và điều khiển không mô hình đang được quan tâm trong robot di động [44]–[49], [71], [72]. Các phương pháp này có tiềm năng trong xử lý bất định và ràng buộc điều khiển, nhưng vẫn còn hạn chế về đảm bảo ổn định, khả năng giải thích, chi phí tính toán và khả năng ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành một cách tường minh.

Từ các phân tích và đối chiếu trên có thể thấy rằng, vẫn còn thiếu các phương pháp điều khiển chịu lỗi cho NWMR có khả năng kết hợp một cách có hệ thống giữa: khai thác cấu trúc phân tầng động học – động lực học của hệ thống, cơ chế quan sát chuyên biệt để xử lý lỗi cơ cấu chấp hành và các yêu cầu về hội tụ nhanh hoặc duy trì sai số bám quỹ đạo trong một miền hiệu năng định trước.

Những khoảng trống này chính là cơ sở khoa học để xác định nhiệm vụ cụ thể cần thực hiện để đạt được mục tiêu đặt ra của luận án:

- Xây dựng một khung điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát cho NWMR, nhằm nâng cao khả năng bù lỗi so với các chiến lược chịu lỗi thụ động và các cấu trúc điều khiển chưa khai thác trực tiếp thông tin lỗi ước lượng [6], [7], [8].
- Phát triển bộ quan sát lỗi phù hợp cho robot di động, cho phép xử lý và tái tạo lỗi cơ cấu chấp hành một cách tường minh và đáng tin cậy hơn so với các tiếp cận dựa trên ước lượng trạng thái mở rộng hoặc nhiễu tổng hợp đã được đề xuất trong các nghiên cứu hiện có [29], [51].
- Nghiên cứu và tổ chức kiến trúc điều khiển phân tầng, trong đó vai trò của các bộ quan sát và bộ điều khiển được phân công rõ ràng theo từng tầng động học – động lực học, nhằm nâng cao tính hệ thống và khả năng mở rộng của phương pháp điều khiển chịu lỗi [36], [52].

- Kết hợp yêu cầu hội tụ nhanh của sai số bám quỹ đạo với việc đảm bảo chất lượng đáp ứng trong quá trình quá độ, khắc phục hạn chế của các phương pháp chỉ tập trung vào thời gian hội tụ mà chưa kiểm soát tường minh hành vi quá độ của hệ thống trong bối cảnh tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành [24], [27], [32], [51].

1.6. Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về robot di động non-holonomic, các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo, quan sát trạng thái, phát hiện lỗi và điều khiển chịu lỗi trong điều kiện có nhiễu, bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành. Thông qua việc phân tích các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước, chương này đã làm rõ các hướng tiếp cận tiêu biểu, xu hướng phát triển cũng như những hạn chế còn tồn tại trong điều khiển NWMR.

Kết quả tổng quan cho thấy phần lớn các nghiên cứu hiện nay tập trung vào nâng cao tính bền vững và chất lượng bám quỹ đạo, trong khi lỗi cơ cấu chấp hành thường được xử lý gián tiếp như một dạng nhiễu hoặc bất định tổng hợp. Bên cạnh đó, việc tích hợp bộ quan sát lỗi trong các kiến trúc điều khiển phân tầng động học – động lực học chưa được khai thác đầy đủ, đặc biệt đối với các hệ NWMR yêu cầu đồng thời khả năng bù lỗi, hội tụ nhanh và kiểm soát chất lượng quá độ của sai số bám.

Từ các phân tích trên, Chương 1 đã xác định khoảng trống nghiên cứu và định hướng chính của luận án, tập trung vào hai nội dung:

(1) Xây dựng bộ điều khiển chịu lỗi hai vòng sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

(2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

Những kết quả tổng quan trong chương này là cơ sở lý thuyết cho các chương tiếp theo. Trên nền tảng đó, Chương 2 sẽ trình bày mô hình động học và động lực học của NWMR có xét đến nhiễu, bất định và lỗi cơ cấu chấp hành, làm cơ sở cho việc thiết kế bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi trong luận án.

CHƯƠNG 2

PHÁT TRIỂN BỘ QUAN SÁT LỖI CƠ CẤU CHẤP HÀNH CHO NWMR

Trong các hệ NWMR, khả năng bám quỹ đạo chính xác và đảm bảo ổn định không chỉ phụ thuộc vào bộ điều khiển mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể từ khả năng quan sát và phát hiện sớm lỗi cơ cấu chấp hành. Trong môi trường công nghiệp, các yếu tố như trượt bánh, sai lệch mô-men, bão hòa truyền động, ma sát và sai số đo lường có thể làm suy giảm hiệu năng, gây sai lệch quỹ đạo hoặc mất ổn định [3], [55], [61]. Do đó, việc xây dựng bộ quan sát lỗi chính xác và tin cậy là nền tảng cho điều khiển chịu lỗi chủ động, theo hướng tích hợp phát hiện – chẩn đoán và bù lỗi trong vòng điều khiển [4]–[7], [37]. Các phương pháp quan sát phi tuyến như HiGO/EHGO và SMO được phát triển nhằm nâng cao tốc độ hội tụ và khả năng kháng nhiễu. Tuy nhiên, SMO thường gặp hiện tượng chattering, trong khi HiGO/EHGO đòi hỏi các giả thiết mô hình tương đối chặt để đảm bảo chất lượng ước lượng trong thực tế [16], [17].

Song song, các phương pháp quan sát hiện đại theo hướng quan sát – ước lượng tham số/bất định và UIO đã được mở rộng để ước lượng đồng thời trạng thái và các thành phần không đo được [18], [28], [58]. Những kết quả này tạo tiền đề cho hướng nghiên cứu kết hợp quan sát lỗi và bù lỗi chủ động, trở thành một trong những trọng tâm của FDD–FTC hiện đại. Nhiều công trình gần đây tập trung vào tích hợp khối quan sát trong cấu trúc điều khiển để vừa nâng cao khả năng ước lượng, vừa cải thiện hiệu năng bám quỹ đạo và khả năng bù bất định. Chẳng hạn, Cui et al. (2025) đề xuất kiến trúc kết hợp quan sát–điều khiển cho robot di động non-holonomic nhằm nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo dưới tác động nhiễu [26]. Trong khi đó, các nghiên cứu theo hướng FTC có xét đa lỗi cơ cấu chấp hành và bão hòa như Wu et al. (2025), cũng như các cấu trúc FTC cho robot có cơ cấu chấp hành dư thừa như Zhang et al. (2019), cho thấy khả năng duy trì hiệu năng khi cơ cấu chấp hành suy giảm hoặc bị ràng buộc bão hòa [35], [61]. Mặc dù các kết quả này đạt được độ chính xác cao, nhiều cách tiếp cận vẫn dựa trên các giả thiết mô hình và điều kiện đo lường tương đối mạnh, điều có thể khó đáp ứng trong vận hành thực tế của NWMR [3], [55], [61].

Trên cơ sở đó, luận án kế thừa và mở rộng các hướng tiếp cận quan sát - bù nhiễu hiện đại để phát triển cấu trúc quan sát lỗi phi tuyến bền vững, theo hướng tách thành phần lỗi và nhiễu gộp bằng cơ chế quan sát phù hợp. Cụ thể, các ý tưởng quan sát nhiễu/tổng bất định dựa trên bộ ước tính nhiễu loạn và trạng thái là cơ sở quan trọng để hình thành cấu trúc quan sát phục vụ điều khiển chịu lỗi trong hệ phi tuyến [19], [29], [50], [51].

Trong hệ robot mà luận án đề cập, lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu loạn chưa biết có thể tác động lên hệ thống thông qua các cơ chế khác nhau, tùy theo mức độ mô hình được xem xét.

Thứ nhất, ở mức động học, lỗi cơ cấu chấp hành làm thay đổi trực tiếp vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc thực tế của robot so với giá trị danh định do bộ điều khiển sinh ra. Khi đó, các sai lệch vận tốc Δv và $\Delta \omega$ xâm nhập trực tiếp vào mô hình sai số bám quỹ đạo, làm biến dạng động lực học của sai số. Các thành phần lỗi này có cấu trúc rõ ràng, xuất hiện thông qua cùng kênh với tín hiệu điều khiển, và do đó có thể được xem là các lỗi khớp (*matched fault*). Trong luận án này, các thành phần lỗi ở mức động học được ước lượng bằng bộ quan sát lỗi.

Thứ hai, ở mức động lực học, lỗi cơ cấu chấp hành cùng với các bất định tham số, nhiễu ma sát, trượt bánh và nhiễu ngoại lai tác động lên mô-men sinh ra bởi động cơ, từ đó ảnh hưởng đến đạo hàm của vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc. Tại mức này, các thành phần lỗi và nhiễu không còn tách biệt rõ ràng, mà được xem như một nhiễu gộp tổng quát. Do đó, luận án sử dụng bộ quan sát trạng thái mở rộng để ước lượng và bù trừ tổng nhiễu này trong thiết kế điều khiển.

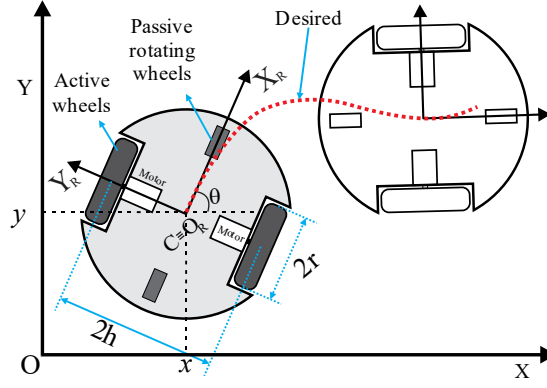
Cách tiếp cận hai tầng cho phép xử lý hiệu quả ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành cả ở mức động học và động lực học, đồng thời nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo và tính chịu lỗi của hệ thống.

Tổng thể, Chương 2 tập trung vào:

1. Xây dựng mô hình động học và động lực học của NWMR có lỗi cơ cấu chấp hành (mục 2.1), mô tả mối liên hệ giữa mô-men điều khiển, lỗi cơ cấu chấp hành và đáp ứng trạng thái.
2. Thiết kế bộ quan sát trạng thái và lỗi cơ cấu chấp hành (mục 2.2), bao gồm cấu trúc quan sát kép với ESO và IFO.
3. Kiểm chứng mô phỏng (mục 2.3) để đánh giá hiệu quả của bộ quan sát cải tiến so với các phương pháp quan sát hiện có.
4. Kết luận chương 2.

2.1. Mô hình toán học của NWMR có lỗi cơ cấu chấp hành

NWMR được xét trong luận án là robot bốn bánh, trong đó hai bánh sau được dẫn động độc lập bởi hai động cơ DC servo, còn các bánh còn lại là bánh bị động có chức năng giữ ổn định cho hệ. Cấu trúc của robot được minh họa trong Hình 2.1.



Hình 2.1. Cấu trúc NWMR

Trong mô hình đề xuất, bán kính của mỗi bánh xe chủ động được ký hiệu là r , và khoảng cách giữa hai bánh chủ động là $2h$. Tâm robot trùng với trung điểm của trục nối tâm hai bánh chủ động. Hệ tọa độ quán tính được ký hiệu là (Oxy) , trong khi hệ tọa độ gắn với robot được ký hiệu là $(O_Rx_Ry_R)$. Vị trí và trạng thái của robot trong hệ tọa độ quán tính được biểu diễn bởi (x, y, θ) , trong khi trong hệ tọa độ gắn với robot được biểu diễn bởi (x_R, y_R, θ) , trong đó θ là góc hướng của robot so với trục Ox . Các tham số m và I tương ứng là khối lượng và mô-men quán tính của robot quanh trục thẳng đứng đi qua tâm.

2.1.1. Phương trình động học robot

Do hệ tọa độ $(O_Rx_Ry_R)$ quay một góc θ so với hệ quán tính, vận tốc của robot trong hai hệ tọa độ liên hệ với nhau thông qua phép biến đổi quay. Ta có [20], [21]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Ma trận trên thể hiện phép quay từ hệ tọa độ gắn với robot sang hệ tọa độ quán tính. Thành phần θ không thay đổi do cả hai hệ cùng chia sẻ trục quay.

Với robot dẫn động vi sai, chuyển động của robot được tạo ra bởi chuyển động quay của hai bánh chủ động. Gọi ω_1 là vận tốc góc bánh phải, ω_2 là vận tốc góc bánh trái. Khi hai bánh quay cùng chiều và cùng tốc độ, robot di chuyển thẳng; khi hai bánh quay khác tốc độ, robot quay quanh trục thẳng đứng đi qua tâm.

Từ quan hệ hình học của chuyển động lăn không trượt, vận tốc tịnh tiến v và vận tốc góc ω của robot được xác định bởi:

$$\begin{cases} v = \frac{r(\omega_1 + \omega_2)}{2} \\ \omega = \frac{r(\omega_1 - \omega_2)}{2h} \end{cases} \quad (2.2)$$

Quan hệ (2.2) cho thấy vận tốc của robot phụ thuộc trực tiếp vào vận tốc quay của hai bánh xe, đây chính là kênh mà lỗi cơ cấu chấp hành sẽ tác động lên hệ thống.

Dựa trên vận tốc tịnh tiến v và vận tốc góc ω , phương trình động học của robot trong hệ tọa độ quán tính được viết dưới dạng:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.1.2. Mô hình sai số bám và ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành

Dựa trên mô hình động học (2.3) thu được, mô hình sai số bám quỹ đạo của robot có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$e_q = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Trong đó quỹ đạo tham chiếu của robot tương ứng với $q_d = [x_d \ y_d \ \theta_d]^T$, x_e, y_e lần lượt là sai số vị trí theo trục Ox và Oy, θ_e là sai số góc hướng của robot.

Lấy đạo hàm theo thời gian của (2.4) và sử dụng mô hình động học của robot, ta thu được mô hình động học của sai số bám:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_d \cos \theta_e \\ -\omega x_e + v_d \sin \theta_e \\ \omega_d - \omega \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Ở đây v_d, ω_d là các giá trị tham chiếu của vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của robot.

Để đảm bảo sai số bám hội tụ về không trong trường hợp không có lỗi, tín hiệu điều khiển danh định được lựa chọn như sau [20], [21]:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \cos \theta_e + k_x x_e \\ \omega_d + k_y v_d y_e + k_\theta \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

với $k_x, k_y, k_\theta > 0$ là các hệ số điều khiển.

Luật điều khiển (2.6) được thiết kế dựa trên giả thiết rằng tín hiệu điều khiển được thực thi chính xác, các động cơ không bị suy giảm hiệu suất, không tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành.

Trong thực tế, các lỗi cơ cấu chấp hành làm thay đổi mô-men sinh ra bởi các động cơ DC, từ đó làm sai lệch vận tốc thực tế của robot so với giá trị danh định. Trong luận án này, lỗi cơ cấu chấp hành được mô hình hóa như đầu vào chưa biết, tác động trực tiếp lên vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc.

Cụ thể, vận tốc thực tế của robot được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} v_f = v - \Delta v \\ \omega_f = \omega - \Delta \omega \end{cases} \quad (2.7)$$

v_f, ω_f là vận tốc thực tế của robot, $\Delta v, \Delta \omega$ là các thành phần lỗi cơ cấu chấp hành chưa biết với $\Delta v = \mu_1 v, \Delta \omega = \mu_2 \omega$ ($0 < \underline{\mu}_i < \mu_i < \bar{\mu}_i < 1$)

Biểu thức (2.7) cho thấy lỗi cơ cấu chấp hành làm thay đổi trực tiếp đầu ra của cơ cấu chấp hành, và không thể đo trực tiếp trong quá trình vận hành.

Khi đó, mô hình động lực học sai số bám trở thành:

$$\dot{e}_q = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_d \cos \theta_e - \Delta \omega y_e + \Delta v \\ -\omega x_e + v_d \sin \theta_e + \Delta \omega x_e \\ \omega_d - \omega + \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Các thành phần lỗi $\Delta v, \Delta \omega$ xâm nhập trực tiếp vào động lực học sai số, thông qua cùng kênh với tín hiệu điều khiển danh định. Do đó, lỗi cơ cấu chấp hành trong mô hình này thuộc loại lỗi đồng kênh/lỗi khớp (*matched fault*), đây là một đặc điểm quan trọng cho phép thiết kế các bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi hiệu quả.

2.1.3. Phương trình động lực học

Trong thực tế, NWMR được dẫn động bởi hai động cơ điện một chiều có encoder (DC servo) thông qua hệ truyền động và hộp giảm tốc. Do đó, để xây dựng mô hình động lực học có ý nghĩa vật lý và làm rõ nguồn gốc của tín hiệu điều khiển cũng như lỗi cơ cấu chấp hành, trước hết cần xem xét mối quan hệ giữa điện áp điều khiển, mô-men truyền động và vận tốc quay của các bánh xe.

Xét hai động cơ DC servo giống nhau dẫn động robot, động lực học điện của mỗi động cơ được mô tả bởi các phương trình điện - cơ sau:

$$u_{mi} = R_m I_{mi} + L_m \dot{I}_{mi} + \varepsilon_{mi}; \quad i = 1, 2 \quad (2.9)$$

trong đó u_{mi} là điện áp điều khiển tác động lên động cơ thứ i ; I_{mi} là dòng điện phản ứng; R_m và L_m lần lượt là điện trở và điện cảm phản ứng; ε_{mi} là sức điện động phản kháng, được xác định bởi:

$$\varepsilon_{mi} = k_\varepsilon \omega_{mi} \quad (2.10)$$

với k_ε là hằng số sức điện động phản kháng và ω_{mi} là tốc độ quay của trục động cơ. Mô-men điện từ sinh ra bởi động cơ được cho bởi:

$$\tau_i = k_\tau I_{mi} \quad (2.11)$$

trong đó k_τ là hằng số mô-men của động cơ.

Kết hợp các quan hệ trên, phương trình điện-cơ của hai động cơ có thể được viết dưới dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} = \frac{R_m}{k_\tau} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \frac{L_m}{k_\tau} \begin{bmatrix} \dot{\tau}_1 \\ \dot{\tau}_2 \end{bmatrix} + k_\varepsilon \begin{bmatrix} \omega_{m1} \\ \omega_{m2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Xét đến hộp giảm tốc với tỷ số truyền N_m , ta có mối quan hệ giữa tốc độ quay trục động cơ và tốc độ quay bánh xe:

$$\omega_{mi} = N_m \omega_i, i = 1, 2 \quad (2.13)$$

Trong nhiều hệ robot di động, động lực học điện của động cơ thường có hằng số thời gian nhỏ hơn nhiều so với động lực học cơ học của robot. Do đó, điện cảm phản ứng L_m có thể được bỏ qua mà không ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của mô hình ở mức hệ thống. Khi đó, kết hợp (2.13) vào (2.12) ta suy ra:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \frac{k_\tau N_m}{R_m} \begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} - \frac{k_\tau k_\varepsilon N_m^2}{R_m} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Đặt các hằng số $B_1 = \frac{k_\tau N_m}{R_m}, B_2 = \frac{k_\tau k_\varepsilon N_m^2}{R_m}$ phương trình (2.14) được viết

gọn lại thành:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} - B_2 \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Sử dụng mối quan hệ động học giữa vận tốc bánh xe và vận tốc của robot đã được thiết lập trong (2.2), ta thu được:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} - B_2 \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{h}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{h}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Phương trình (2.16) cho thấy mô-men tác động lên các bánh xe phụ thuộc trực tiếp vào điện áp điều khiển và vận tốc của robot. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng mô hình động lực học tổng thể của robot và đồng thời giải thích nguồn gốc vật lý của các lỗi cơ cấu chấp hành sẽ được mô hình hóa trong các mục tiếp theo.

Xuất phát từ phương trình Euler–Lagrange tổng quát của hệ cơ học có ràng buộc, mô hình động lực học của robot di động non-holonomic trong luận án này được viết dưới dạng [7], [8], [20], [21]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D = B(q)\tau + A^T(q)\lambda_L \quad (2.17)$$

trong đó $q = [x \ y \ \theta]^T$ là vector trạng thái; $M(q)$ là ma trận đối xứng xác định dương; $G(q)$ biểu diễn vector mô-men trọng lực; D là vector nhiễu tác động bên ngoài và được giả thiết là bị chặn; $B(q)$ là ma trận biến đổi đầu vào; τ là vector tín

hiệu điều khiển; λ_L là vector lực ràng buộc Lagrange; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ biểu diễn các thành phần mô-men Coriolis và ly tâm.

NWMR không thể chuyển động ngang tức thời nên ràng buộc vận tốc có dạng:

$$\begin{aligned} \dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta &= 0 \\ \Leftrightarrow A(q)\dot{q} &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

trong đó: $A(q) = [-\sin \theta \quad \cos \theta \quad 0]$

Lực ràng buộc tương ứng được biểu diễn bởi $A^T(q)\lambda_L$, với λ_L là vector các nhân tử Lagrange chưa biết. Do tồn tại các ràng buộc vận tốc dạng non-holonomic, các thành phần của vector vận tốc tổng quát $\dot{q}$ không độc lập tuyến tính. Để loại bỏ ảnh hưởng của lực ràng buộc λ_L , ta biểu diễn $\dot{q}$ dưới dạng một ánh xạ tuyến tính của các biến vận tốc độc lập trong không gian con thỏa mãn điều kiện ràng buộc.

Xét vector vận tốc của robot trong hệ tọa độ gắn với thân robot được ký hiệu là $\vartheta = [v \quad \omega]^T$. Mỗi quan hệ giữa vector vận tốc tổng quát $\dot{q}$ và ϑ được xác định từ mô hình động học của robot dưới dạng:

$$\dot{q} = S(q)\vartheta \quad (2.19)$$

với $S(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ là ma trận phân bố vận tốc.

Do thỏa mãn điều kiện:

$$A(q)S(q) = 0 \quad (2.20)$$

(2.19) thỏa mãn ràng buộc non-holonomic của hệ. Khi đó, ϑ đóng vai trò là vector vận tốc độc lập, cho phép mô tả chuyển động của robot trong không gian cấu hình mà không cần xét đến các nhân tử Lagrange liên quan đến lực ràng buộc.

Lấy đạo hàm theo thời gian của (2.19), ta thu được:

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\vartheta + S(q)\dot{\vartheta} \quad (2.21)$$

Thay (2.19) và (2.21) vào phương trình động lực học (2.17), ta được:

$$M(q)(S(q)\dot{\vartheta} + \dot{S}(q)\vartheta) + C(q, \dot{q})S(q)\vartheta + G(q) + D = B(q)\tau + A^T(q)\lambda \quad (2.22)$$

Nhân hai vế của (2.22) với $S^T(q)$, đồng thời kết hợp $S^T(q)A^T(q) = 0$, ta loại bỏ hoàn toàn lực ràng buộc, biểu thức sau biến đổi thu được:

$$S^T MS\dot{\vartheta} + S^T M\dot{S}\vartheta + S^T CS\vartheta + S^T G + S^T D = S^T B\tau \quad (2.23)$$

Bằng cách ký hiệu các ma trận rút gọn: $M_r(\theta) = S^T MS$, $G_r(\theta) = S^T G$,

$C_r(\theta, v) = S^T (M\dot{S} + CS)$, $D_r = S^T D$, $B_r(\theta) = S^T B$. Khi đó, phương trình động lực học rút gọn của robot trong không gian vận tốc có dạng [20],[21]:

$$M_r(\theta)\dot{\mathcal{G}} + C_r(\theta, \mathcal{G})\mathcal{G} + G_r(\theta) + D_r = B_r(\theta)\tau \quad (2.24)$$

Với robot di động chuyển động trên mặt phẳng ngang, ảnh hưởng của trọng lực không tạo mô-men quanh trục quay, do đó $G_r(\theta) = 0$.

Do $M_r(\theta)$ là ma trận xác định dương và khả nghịch, nhân hai vế của (2.24) với $M_r^{-1}(\theta)$, ta thu được:

$$\dot{\mathcal{G}} = M_r^{-1}(\theta)B_r(\theta)\tau - M_r^{-1}(\theta)C_r(\theta, \mathcal{G})\mathcal{G} - M_r^{-1}(\theta)D_r \quad (2.25)$$

Thay τ từ (2.15) và gộp các thành phần phi tuyến, nhiễu và bất định chưa biết vào một vector nhiễu gộp, mô hình (2.25) được viết dưới dạng tường minh:

$$\begin{cases} \dot{v} = k_1 u_1 + k_2 v + D_1 \\ \dot{\omega} = k_3 u_2 + k_4 \omega + D_2 \end{cases} \quad (2.26)$$

trong đó:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{B_1}{rm}, k_2 = -\frac{2B_2}{mr^2}, k_3 = \frac{hB_1}{Ir}, k_4 = -\frac{2h^2 B_2}{Ir^2} \\ D_1 = -\frac{1}{m}(C_r(1,1)v + C_r(1,2)\omega + D_{r1}) \\ D_2 = -\frac{1}{I}(C_r(2,1)v + C_r(2,2)\omega + D_{r2}) \\ u_1 = u_{m1} + u_{m2}, u_2 = u_{m1} - u_{m2} \end{cases}$$

D_1, D_2 là nhiễu gộp và bất định tham số, bao gồm ma sát, sai số mô hình và nhiễu ngoại lai.

2.1.4. Mô hình động lực học với ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành

Mô hình (2.26) cho thấy rằng động lực học của robot trong không gian vận tốc có cấu trúc tuyến tính theo đầu vào điều khiển, trong khi các phi tuyến và bất định đã được gộp vào các thành phần nhiễu chưa biết. Dạng mô hình này đặc biệt thuận lợi cho việc thiết kế các chiến lược điều khiển và quan sát. Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng mô hình (2.26) được xây dựng trong giả thiết các cơ cấu chấp hành hoạt động lý tưởng, tức là các động cơ dẫn động không bị suy giảm hiệu suất, tín hiệu điều khiển được thực thi chính xác theo giá trị tính toán, không tồn tại sai lệch có hệ thống trong kênh truyền động.

Trong thực tế vận hành, các giả thiết trên khó có thể được đảm bảo trong suốt vòng đời của robot. Các động cơ và cơ cấu truyền động thường chịu ảnh hưởng của quá trình lão hóa, mài mòn cơ khí, thay đổi nhiệt độ làm việc và điều kiện tải, dẫn đến việc mất hiệu suất hoặc sai lệch mô-men truyền động. Khi đó, tín hiệu điều khiển thực tế tác động lên robot không còn trùng khớp với tín hiệu điều khiển danh định u_1, u_2 được thiết kế dựa trên mô hình (2.26).

Hệ quả trực tiếp là vận tốc v và ω không còn tuân theo động lực học danh định, sai số bám quỹ đạo tăng lên, thậm chí có thể gây mất ổn định hệ thống nếu bộ điều khiển không có khả năng thích nghi hoặc bù lỗi. Do đó, để đảm bảo tính tin cậy và an toàn trong quá trình vận hành, việc mô hình hóa và nhận diện lỗi cơ cấu chấp hành là yêu cầu thiết yếu đối với hệ thống robot di động non-holonomic.

a) Mô hình mở rộng có lỗi cơ cấu chấp hành

Trong thực tế, tín hiệu điều khiển danh định do bộ điều khiển sinh ra không tác động trực tiếp và đầy đủ lên các động cơ do sự tồn tại của lỗi cơ cấu chấp hành, chẳng hạn như suy giảm hiệu suất bộ khuếch đại, hao mòn động cơ hoặc nhiễu điện. Để phản ánh hiện tượng này, giả sử rằng tín hiệu điều khiển thực tế tác động lên mỗi động cơ được mô hình hóa dưới dạng [7],[8]:

$$u_{mi}^f(t) = (1 - \alpha_i)u_{mi}(t) + \Delta u_{mi}(t); \quad i = 1, 2 \quad (2.27)$$

trong đó:

- $u_{mi}(t)$ là tín hiệu điều khiển danh định
- $u_{mi}^f(t)$ là tín hiệu điều khiển thực tế tác động lên động cơ
- $\alpha_i \in [0,1)$ là hệ số suy giảm hiệu suất truyền động
- $\Delta u_{mi}(t)$ là thành phần sai lệch không cấu trúc, biểu diễn nhiễu chưa biết hoặc lỗi phụ không được mô hình hóa chính xác.

Biểu thức (2.27) cho phép mô tả nhiều dạng lỗi cơ cấu chấp hành phổ biến trong một khuôn khổ thống nhất:

- Khi $\alpha_i = 0$, $\Delta u_{mi}(t) = 0$ hệ thống hoạt động trong điều kiện không lỗi
- Khi $0 < \alpha_i < 1$ xuất hiện lỗi suy giảm hiệu suất truyền động
- Khi $\Delta u_{mi}(t) \neq 0$ tồn tại nhiễu hoặc sai lệch phụ không xác định

Do đó, khi xét đến lỗi tác động, tín hiệu điều khiển thực tế trên hai kênh trong mô hình động lực học (2.26) được xác định:

$$\begin{cases} u_1^f = u_{m1}^f + u_{m2}^f = u_{m1} + u_{m2} - (\alpha_1 u_{m1} + \alpha_2 u_{m2} - \Delta u_{m1} - \Delta u_{m2}) = u_1 - \Delta u_v \\ u_2^f = u_{m1}^f - u_{m2}^f = u_{m1} - u_{m2} - (\alpha_1 u_{m1} - \alpha_2 u_{m2} - \Delta u_{m1} + \Delta u_{m2}) = u_2 - \Delta u_\omega \end{cases} \quad (2.28)$$

trong đó $\Delta u_v = \alpha_1 u_{m1} + \alpha_2 u_{m2} - \Delta u_{m1} - \Delta u_{m2}$, $\Delta u_\omega = \alpha_1 u_{m1} - \alpha_2 u_{m2} - \Delta u_{m1} + \Delta u_{m2}$.

Thay thế các tín hiệu điều khiển $u_i(t)$ trong mô hình động lực học (2.26) bằng tín hiệu thực tế $u_i^f(t)$ theo (2.28), ta thu được

$$\begin{cases} \dot{v} = k_1 u_1 + k_2 v - k_1 \Delta u_v + D_1 \\ \dot{\omega} = k_3 u_2 + k_4 \omega - k_3 \Delta u_\omega + D_2 \end{cases} \quad (2.29)$$

Nhóm các thành phần tương ứng, hệ phương trình trên có thể được viết lại dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{v} = k_1 u_1 + k_2 v + D_v \\ \dot{\omega} = k_3 u_2 + k_4 \omega + D_\omega \end{cases} \quad (2.30)$$

Các đại lượng $D_v = -k_1 \Delta u_v + D_1$ và $D_\omega = -k_3 \Delta u_\omega + D_2$ là các nhiễu gộp mở rộng, bao gồm đồng thời ảnh hưởng của nhiễu ngoài, bất định mô hình và sai lệch phát sinh do lỗi cơ cấu chấp hành. Nhờ cách biểu diễn này, ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành không cần được nhận dạng riêng rẽ thông qua các tham số α_i và Δu_{mi} , mà được quy đổi thành hai thành phần nhiễu tương đương tác động trực tiếp vào động lực học của vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc.

b) Giả thiết cho lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu

Để đảm bảo tính khả thi của việc thiết kế bộ quan sát và điều khiển chịu lỗi, một số giả thiết chuẩn được đưa ra cho mô hình (2.30).

Giả thiết 2.1. Giới hạn của nhiễu gộp mở rộng và đạo hàm của chúng

Giả sử rằng các thành phần nhiễu gộp mở rộng D_v và D_ω bao gồm ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành, bất định mô hình và nhiễu ngoài, được giả thiết là bị chặn và khả vi từng đoạn. Ngoài ra, đạo hàm theo thời gian của chúng cũng bị chặn:

$$|D_v| \leq \zeta_v, |D_\omega| \leq \zeta_\omega \quad (2.31)$$

$$|\dot{D}_v| \leq \bar{\zeta}_1, |\dot{D}_\omega| \leq \bar{\zeta}_2 \quad (2.32)$$

trong đó $\zeta_v, \zeta_\omega, \bar{\zeta}_1, \bar{\zeta}_2$ là các hằng số dương hữu hạn nhưng chưa biết.

Giả thiết này phản ánh thực tế rằng lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu vật lý không thể tăng vô hạn trong điều kiện vận hành bình thường của robot. Giả thiết này là điều kiện cơ bản và phổ biến trong thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng, phù hợp với các hiện tượng vật lý thực tế và đã được sử dụng rộng rãi trong các công trình trước đây như [32], [33].

Giả thiết 2.2. Lỗi cơ cấu chấp hành dạng khớp kênh điều khiển tương đương

Trong mô hình rút gọn (2.30), ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành, bất định mô hình và nhiễu ngoài được gộp vào hai thành phần D_v và D_ω . Các thành phần này được giả thiết là các hàm chưa biết nhưng bị chặn và tác động trực tiếp vào hai phương trình động lực học của vận tốc tuyến tính và vận tốc góc. Do đó, chúng có thể được xem là các nhiễu/lỗi tương đương trên hai kênh điều khiển u_i .

Cụ thể, do $k_1, k_3 \neq 0$, ảnh hưởng của D_v và D_ω có thể được bù thông qua các tín hiệu điều khiển u_i . Giả thiết này cho phép thiết kế bộ quan sát để ước lượng trực

tiếp D_v và D_ω , sau đó sử dụng các giá trị ước lượng này trong luật điều khiển chịu lỗi nhằm giảm ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành lên quá trình bám quỹ đạo.

2.2. Thiết kế bộ quan sát trạng thái và lỗi cơ cấu chấp hành

Ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành và các nhiễu gộp đã được mô hình hóa tường minh trong động lực học vận tốc của robot di động non-holonomic ở (2.30). Trong thực tế, D_v và D_ω không thể đo trực tiếp bằng cảm biến, trong khi chúng lại tác động trực tiếp đến động lực học vận tốc và do đó ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng điều khiển bám quỹ đạo của robot. Vì vậy, việc ước lượng chính xác các thành phần lỗi cơ cấu chấp hành là yêu cầu thiết yếu để nâng cao độ tin cậy và khả năng chịu lỗi của hệ thống.

2.2.1. Bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành

Theo tài liệu [19], một bộ quan sát lỗi có thể được thiết kế cho hệ phi tuyến tổng quát được mô tả bởi phương trình:

$$\begin{cases} \dot{z} = f(z) + g_1(z)u + g_2(z)F_a \\ y = h(z) \end{cases} \quad (2.33)$$

trong đó:

- z là vector trạng thái của hệ,
- u là vector tín hiệu điều khiển,
- F_a là vector lỗi cơ cấu chấp hành,
- y là đầu ra đo được của hệ thống.

Dựa trên mô hình sai số bám của robot di động đã được thiết lập ở Mục 2.1.2, phương trình động lực học sai lệch bám trong (2.8) có thể được viết lại dưới dạng tương đương như sau:

$$\begin{cases} \dot{z} = f(z) + g_1(z)u + g_2(z)F_a \\ e_q = z \end{cases} \quad (2.34)$$

Trong đó:

$$z = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} v_d \cos \theta_e - v \\ \omega_d - \omega \end{bmatrix}, f(z) = \begin{bmatrix} y_e \omega_d \\ v_d \sin \theta_e - x_e \omega_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g_1(z) = \begin{bmatrix} 1 & -y_e \\ 0 & x_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; g_2(z) = \begin{bmatrix} 1 & -y_e \\ 0 & x_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; F_a = \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \end{bmatrix}$$

Trên cơ sở đó, bộ quan sát lỗi được xây dựng dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{z}_p = -L(z) \left[g_1(z)u + g_2(z)(z_p + p(z)) + f(z) \right] \\ \hat{F}_a = z_p + p(z) \end{cases} \quad (2.35)$$

trong đó: z_p là vector trạng thái phụ của bộ quan sát lỗi,

- $\hat{F}_a$ là giá trị ước lượng của lỗi cơ cấu chấp hành,
- $L(z)$ là ma trận hệ số khuếch đại của bộ quan sát,
- $p(z)$ là hàm phi tuyến được thiết kế nhằm tái cấu trúc lỗi.

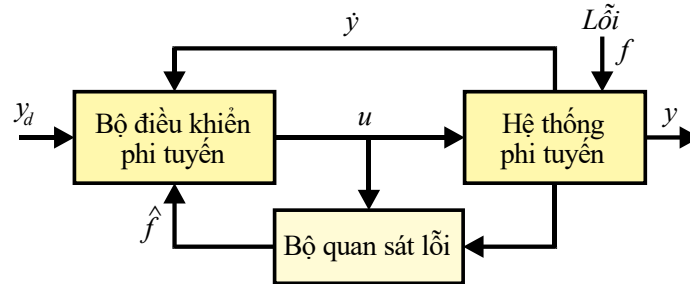
Gọi sai số quan sát lỗi là $\tilde{F}_a = F_a - \hat{F}_a$, giả sử rằng lỗi cơ cấu chấp hành F_a biến thiên chậm so với động lực học của bộ quan sát, tức là $\dot{\tilde{F}}_a \approx 0$.

Dưới giả thiết này, động lực học của sai số quan sát có thể được viết thành:

$$\dot{\tilde{F}}_a = -\dot{z}_p - \dot{p}(z) = -L(z)g_2(z)\tilde{F}_a \quad (2.36)$$

Bằng cách lựa chọn thích hợp hàm phi tuyến $p(z)$ và ma trận khuếch đại $L(z)$ thỏa mãn $L(z) = \partial p(z) / \partial z$, sai số ước lượng $\tilde{F}_a$ sẽ hội tụ tiệm cận về không. Tính hội tụ này đã được chứng minh trong công trình [19], [62].

Khác với các bộ quan sát trạng thái mở rộng thường gộp lỗi và nhiễu thành một nhiễu tổng, bộ quan sát trong luận án này hướng tới việc tái cấu trúc trực tiếp lỗi cơ cấu chấp hành dưới dạng các sai lệch vận tốc có ý nghĩa vật lý rõ ràng. Cách tiếp cận này phù hợp với kiến trúc điều khiển chịu lỗi chủ động, trong đó thông tin lỗi được khai thác tường minh trong luật điều khiển.



Hình 2.2. Bộ quan sát lỗi trong hệ thống điều khiển.

2.2.2. Thiết kế bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành cải tiến

Mặc dù bộ quan sát lỗi cơ bản trong (2.35) cho phép ước lượng chính xác lỗi cơ cấu chấp hành trong trạng thái xác lập, tuy nhiên trong quá trình triển khai thực tế, bộ quan sát này thường xuất hiện quá độ ban đầu lớn. Hiện tượng này đặc biệt rõ rệt khi lỗi cơ cấu chấp hành tồn tại ngay từ thời điểm khởi động hệ thống, bộ quan sát được khởi tạo với điều kiện ban đầu bằng không, $z_p(0) = 0$. Tín hiệu lỗi ước lượng khi đó có thể xuất hiện xung lớn, nếu tín hiệu này được đưa trực tiếp vào bộ điều

khuyến động học, hệ thống sẽ sinh ra các tín hiệu điều khiển đột ngột, làm suy giảm chất lượng điều khiển vòng kín.

Để khắc phục hạn chế này, luận án đề xuất một bộ quan sát lỗi cải tiến với cơ chế khởi tạo thích nghi, trong đó hệ số khuếch đại của bộ quan sát được kích hoạt dần từ giá trị không (*soft-start*), thuật ngữ hiệu chỉnh được đưa vào từ từ trong khoảng thời gian khởi động (*warm-up*), tín hiệu lỗi ước lượng được làm trơn để giảm dao động tần số cao.

Bộ quan sát lỗi cải tiến được mô tả bởi:

$$\begin{cases} \dot{z}_p = -L(t)g_2(z)z_p - K(t)L(t)[g_2(z)p(z) + f(z) + g_1(z)u] \\ \hat{F}_a = z_p + p(z) \end{cases} \quad (2.37)$$

trong đó $L(t)$ và $K(t)$ là các hàm lập lịch theo thời gian.

Các hàm lập lịch này được lựa chọn như sau:

$$L(t) = \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_L}\right)\right)\right)L_0, K(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{T_{init}}\right)^2\right) \quad (2.38)$$

với L_0 là ma trận khuếch đại danh định có hạng đầy đủ, τ_L là hằng số thời gian *soft-start*, T_{init} là khoảng thời gian *warm-up*.

Để hạn chế ảnh hưởng của thành phần hiệu chỉnh lớn trong tín hiệu lỗi ước lượng, một cơ chế trộn có trọng số được sử dụng:

$$\hat{F}_{asm}(t) = \beta_d(z_p + p(z)) + (1 - \beta_d)z_p, 0 < \beta_d < 1, \quad (2.39)$$

và $\hat{F}_{asm}$ được sử dụng cho mục đích bù lỗi trong bộ điều khiển.

Giả thiết 2.3. Điều kiện trơn, bị chặn và kích hoạt của bộ quan sát lỗi cải tiến

G1) Các hàm f, g_1, g_2, p là trơn và bị chặn trên miền làm việc, nghĩa là tồn tại

$$F, G_1, G_2, P, \dot{P} \quad \text{sao cho} \quad \|f(z)\| \leq F, \quad \|g_1(z)\| \leq G_1, \quad \|g_2(z)\| \leq G_2, \\ \|p(z)\| \leq P, \quad \|\dot{p}(z)\| \leq \dot{P}.$$

G2) $F_a(t), \dot{F}_a(t)$ bị chặn: $\|F_a(t)\| \leq \chi_1, \|\dot{F}_a(t)\| \leq \chi_2$ với $\chi_1, \chi_2 > 0$

G3) L_0 là ma trận khuếch đại hằng có hạng đầy đủ. Sau giai đoạn khởi tạo, tồn tại hằng số $\alpha_L > 0$ sao cho phần đối xứng của $L(t)g_2(z)$ thỏa mãn

$$\left(L(t)g_2(z) + g_2^T(z)L^T(t)\right) \geq 2\alpha_L I, \quad \forall t \geq t_s$$

G4) $K(t)$ là hàm liên tục, không giảm, thỏa mãn $K(0) = 0$ và $\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = 1$.

G5) Tín hiệu $u(t)$ là đo được và bị chặn: $\|u(t)\| \leq U_{\max}$, $\|\dot{u}(t)\| \leq \dot{U}_{\max}$ với $U_{\max}, \dot{U}_{\max} > 0$.

Định lý 2.1: Dưới các giả thiết 2.3, sai số ước lượng lỗi của bộ quan sát (2.37) là bị chặn cuối cùng đồng đều (UUB). Nếu lỗi biến thiên chậm và các hàm lập lịch hội tụ về giá trị danh định, thì sai số ước lượng hội tụ tiệm cận về không.

Chứng minh:

Sai số ước lượng của bộ quan sát:

$$\tilde{F}_a(t) = F_a(t) - \hat{F}_a(t) \quad (2.40)$$

Đạo hàm (2.40), ta có:

$$\dot{\tilde{F}}_a = \dot{F}_a - \dot{z}_p - \dot{p}(z) \quad (2.41)$$

Thay $\dot{z}_p$ từ (2.37):

$$\dot{z}_p = -L(t)g_2(z)z_p - K(t)L(t)(g_2(z)p(z) + f(z) + g_1(z)u) \quad (2.42)$$

Do đó:

$$\dot{\tilde{F}}_a = \dot{F}_a + L(t)g_2(z)z_p + K(t)L(t)(g_2(z)p(z) + f(z) + g_1(z)u) - \dot{p}(z) \quad (2.43)$$

Sử dụng biểu thức $z = F_a - p(z) - \tilde{F}_a$ ta rút ra:

$$\dot{\tilde{F}}_a = -L(t)g_2(z)\tilde{F}_a + w(t) \quad (2.44)$$

trong đó:

$$w(t) = \dot{F}_a + L(t)g_2(z)(F_a - p(z)) + K(t)L(t)(g_2(z)p(z) + f(z) + g_1(z)u) - \dot{p}(z)$$

Theo Giả thiết 2.3 tất cả các thành phần trong $w(t)$ bị chặn trên miền đã chọn, vậy nên tồn tại $W_{\max} > 0$ với $\|w(t)\| \leq W_{\max} > 0$ trên miền thời gian $t \geq 0$.

Chọn hàm Lyapunov xác định dương là:

$$V_{21} = \frac{1}{2} \|\tilde{F}_a\|^2 \quad (2.45)$$

Đạo hàm 2 vế của (2.45), kết hợp với (2.44) ta có:

$$\dot{V}_{21} = \tilde{F}_a^T \dot{\tilde{F}}_a = -\tilde{F}_a^T L(t)g_2(z)\tilde{F}_a + \tilde{F}_a^T w(t) \quad (2.46)$$

$g_2(z)$ bị chặn, tron trên miền xác định, phần đối xứng của $L(t)g_2(z)$, tồn tại

$\alpha_L > 0$ thỏa mãn $\frac{1}{2} \left(L(t)g_2(z) + g_2^T(z)L^T(t) \right) \geq \alpha_L I$ trên miền làm việc. Do đó, ta có:

$$\tilde{F}_a^T L(t)g_2(z)\tilde{F}_a \geq \alpha_L \|\tilde{F}_a\|^2, \forall t \geq t_s \quad (2.47)$$

Áp dụng Cauchy–Schwarz kết hợp với bất đẳng thức Young, theo dạng $ab \leq \frac{\alpha_L}{2} a^2 + \frac{1}{2\alpha_L} b^2, \forall \alpha_L > 0$ với $a = \|\tilde{F}_a\|, b = \|w(t)\|$, ta suy ra:

$$\dot{V}_{21} \leq -\alpha_L \|\tilde{F}_a\|^2 + \|\tilde{F}_a\| \|w(t)\| \leq -\frac{\alpha_L}{2} \|\tilde{F}_a\|^2 + \frac{1}{2\alpha_L} \|w(t)\|^2 \quad (2.48)$$

Do vậy:

$$\dot{V}_{21} \leq -c_1 V_{21} + c_2, c_1 = \alpha_L, c_2 = \frac{w_{\max}^2}{2\alpha_L} \quad (2.49)$$

Bất đẳng thức vi phân trên suy ra rằng $V_{21}(t)$ và $\|\tilde{F}_a(t)\|$ là bị chặn cuối cùng đồng đều (UUB): $\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{F}_a(t)\| \leq \frac{w_{\max}}{\alpha_L}$. Điều này chứng minh tính UUB của sai số ước lượng

Đối với trường hợp hội tụ tiệm cận, giả sử rằng $\dot{F}_a(t) \rightarrow 0$ và $L(t) \rightarrow L_\infty > 0$, $K(t) \rightarrow 1$, Khi đó từng thành phần của $w(t)$ đều tiệm cận về không và phương trình (2.44) tiệm cận về hệ tuyến tính ổn định: $\ddot{\tilde{F}}_a = -L_\infty g_2(z) \tilde{F}_a$. Vậy nên $\tilde{F}_a(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$.

Bộ quan sát với cơ chế khởi tạo thích nghi được đề xuất trong (2.37) - (2.39) đã khắc phục hiệu quả hiện tượng xung lớn ở giai đoạn khởi động, vốn thường xuất hiện trong bộ quan sát cơ sở, đồng thời vẫn đảm bảo tính UUB của sai số ước lượng dưới các giả thiết trơn và bị chặn tương đối nhẹ. Khi lỗi biến thiên chậm theo thời gian và các hàm điều phối hội tụ về giá trị danh định, bộ ước lượng đạt được hội tụ tiệm cận đến lỗi thực. Bộ quan sát có cấu trúc đơn giản, dễ triển khai trong thực tế và có thể tích hợp trực tiếp vào kiến trúc điều khiển NWMR thông qua tín hiệu ước lượng $\hat{F}_{asm}$.

2.2.3. Thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng

Trong mô hình động lực học của robot thể hiện trên (2.30), các thành phần phi tuyến, bất định mô hình và nhiễu ngoại lai đã được gộp chung vào các nhiễu gộp chưa biết. Mục tiêu của bộ quan sát trạng thái mở rộng là ước lượng các trạng thái vận tốc và đồng thời tái tạo các nhiễu gộp D_v, D_ω theo thời gian thực, từ đó cho phép thiết kế các bộ điều khiển bù nhiễu và chịu lỗi một cách hiệu quả.

Dựa trên mô hình động lực học (2.30) và giả thiết 2.1, một bộ quan sát trạng thái mở rộng phi tuyến được đề xuất dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{\hat{v}} = k_1 u_1 + k_2 v + \hat{D}_v - \rho_1 fal(\hat{e}_v) \\ \dot{\hat{D}}_v = -\rho_2 fal(\hat{e}_v) \\ \dot{\hat{\omega}} = k_3 u_2 + k_4 \omega + \hat{D}_\omega - \rho_1 fal(\hat{e}_\omega) \\ \dot{\hat{D}}_\omega = -\rho_2 fal(\hat{e}_\omega) \end{cases} \quad (2.50)$$

trong đó:

- $\hat{v}, \hat{\omega}$ là các ước lượng của vận tốc v, ω
- $\hat{D}_v, \hat{D}_\omega$ là các ước lượng của nhiễu gộp D_v, D_ω
- $\hat{e}_v = \hat{v} - v, \hat{e}_\omega = \hat{\omega} - \omega$ là các sai số ước lượng trạng thái vận tốc
- $\hat{e}_{D_v} = \hat{D}_v - D_v, \hat{e}_{D_\omega} = \hat{D}_\omega - D_\omega$ là sai số ước lượng nhiễu
- $\rho_1, \rho_2 > 0$ là các hệ số khuếch đại của bộ quan sát.

Hàm phi tuyến $fal(.)$ được sử dụng nhằm cải thiện khả năng hội tụ và giảm nhiễu đo, được định nghĩa như sau [36], [51], [63]:

$$fal(\hat{e}_i) = \begin{cases} \frac{\hat{e}_i}{\gamma^{1-\alpha}} & \text{if } |\hat{e}_i| \leq \gamma \\ |\hat{e}_i|^\alpha sign(\hat{e}_i) & \text{if } |\hat{e}_i| > \gamma \end{cases}, i = (v, \omega) \quad (2.51)$$

với $0 < \alpha < 1$ và $\gamma > 0$ là các tham số thiết kế.

Lấy đạo hàm theo thời gian của các sai số ước lượng trạng thái và nhiễu gộp, ta thu được:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_v = \dot{\hat{v}} - \dot{v} \\ \dot{\hat{e}}_\omega = \dot{\hat{\omega}} - \dot{\omega} \\ \dot{\hat{e}}_{D_v} = \dot{\hat{D}}_v - \dot{D}_v \\ \dot{\hat{e}}_{D_\omega} = \dot{\hat{D}}_\omega - \dot{D}_\omega \end{cases} \quad (2.52)$$

Thay (2.30) và (2.50) vào (2.52) ta lần lượt có:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}}_v &= (k_1 u_1 + k_2 v + \hat{D}_v - \rho_1 fal(\hat{e}_v)) - (k_1 u_1 + k_2 v + D_v) = \hat{D}_v - D_v - \rho_1 fal(\hat{e}_v) \\ &= \hat{e}_{D_v} - \rho_1 fal(\hat{e}_v) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}}_\omega &= (k_3 u_2 + k_4 \omega + \hat{D}_\omega - \rho_1 fal(\hat{e}_\omega)) - (k_3 u_2 + k_4 \omega + D_\omega) = \hat{D}_\omega - D_\omega - \rho_1 fal(\hat{e}_\omega) \\ &= \hat{e}_{D_\omega} - \rho_1 fal(\hat{e}_\omega) \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{e}}_{D_v} = -\rho_2 fal(\hat{e}_v) - \dot{D}_v$$

$$\dot{\hat{e}}_{D_\omega} = -\rho_2 fal(\hat{e}_\omega) - \dot{D}_\omega$$

Từ các kết quả trên, hệ phương trình động lực học của sai số bộ quan sát được viết gọn lại thành:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_v &= \hat{e}_{D_v} - \rho_1 \text{fal}(\hat{e}_v) \\ \dot{\hat{e}}_{D_v} &= -\rho_2 \text{fal}(\hat{e}_v) - \zeta_1 \\ \dot{\hat{e}}_\omega &= \hat{e}_{D_\omega} - \rho_1 \text{fal}(\hat{e}_\omega) \\ \dot{\hat{e}}_{D_\omega} &= -\rho_2 \text{fal}(\hat{e}_\omega) - \zeta_2 \end{cases} \quad (2.53)$$

trong đó $\dot{D}_v = \zeta_1(t)$, $\dot{D}_\omega = \zeta_2(t)$ là các nhiễu gộp bị chặn theo Giả thiết 2.1, với $|\zeta_1| \leq \bar{\zeta}_1, |\zeta_2| \leq \bar{\zeta}_2$.

Đặt

$$\kappa_l(\hat{e}_l) = \begin{cases} \frac{\text{fal}(\hat{e}_l)}{\hat{e}_l} & \text{if } \hat{e}_l \neq 0 \\ \text{fal}'(0) & \text{if } \hat{e}_l = 0 \end{cases}, l = (v, \omega) \quad (2.54)$$

Khi đó $\text{fal}(\hat{e}_l) = \kappa_l(\hat{e}_l)\hat{e}_l$. Xét lân cận $\hat{e}_l = 0$, giả sử hàm $\text{fal}(\cdot)$ khả vi trong lân cận gốc và $\text{fal}(0) = 0$, $\text{fal}'(0) = \kappa_f > 0$. Hệ (2.53) có thể được xấp xỉ tuyến tính cục bộ bằng khai triển Taylor bậc nhất:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_v &= \hat{e}_{D_v} - \rho_1 \kappa_f \hat{e}_v \\ \dot{\hat{e}}_{D_v} &= -\rho_2 \kappa_f \hat{e}_v - \zeta_1 \\ \dot{\hat{e}}_\omega &= \hat{e}_{D_\omega} - \rho_1 \kappa_f \hat{e}_\omega \\ \dot{\hat{e}}_{D_\omega} &= -\rho_2 \kappa_f \hat{e}_\omega - \zeta_2 \end{cases} \quad (2.55)$$

Đặt $\psi_1 = \rho_1 \kappa_f$, $\psi_2 = \rho_2 \kappa_f$, hệ sai số có thể được viết gọn dưới dạng ma trận:

$$\dot{E} = \Psi E + C \zeta \quad (2.56)$$

trong đó: $E = \begin{bmatrix} \hat{e}_v & \hat{e}_\omega \\ \hat{e}_{D_v} & \hat{e}_{D_\omega} \end{bmatrix}$, $\Psi = \begin{bmatrix} -\psi_1 & 1 \\ -\psi_2 & 0 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$, $\zeta = [\zeta_1 \quad \zeta_2]$

Các tham số ψ_1 , ψ_2 được xác định thông qua phương pháp đặt cực:

$$\det(sI_D - \Psi) = s^2 + \psi_1 s + \psi_2 = (s + \Lambda)^2 I_D \quad (2.57)$$

trong đó I_D là ma trận đơn vị và Λ là băng thông của bộ quan sát. Chọn cực kép tại $-\Lambda$ ta có $\psi_1 = 2\Lambda$, $\psi_2 = \Lambda^2$.

Định lý 2.2. Xét mô hình động lực học vận tốc của NWMR được cho bởi (2.30) và bộ quan sát trạng thái mở rộng được thiết kế theo (2.50). Dưới giả thiết 2.1, tồn tại các hằng số dương ρ_1, ρ_2 sao cho các sai số ước lượng trạng thái và nhiễu gộp

$\hat{e}_v, \hat{e}_\omega, \hat{e}_{D_v}, \hat{e}_{D_\omega}$ của bộ quan sát trạng thái mở rộng là UUB. Nếu $\dot{D}_v \rightarrow 0, \dot{D}_\omega \rightarrow 0$ thì các sai số ước lượng trạng thái và nhiễu gộp hội tụ tiệm cận về 0:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_v(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_{D_v}(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_\omega(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_{D_\omega}(t) = 0 \end{cases} \quad (2.58)$$

Chứng minh:

Đặt $E_l = [\hat{e}_l \quad \hat{e}_{D_l}]^T$ trong đó $l = \{v, \omega\}$. Từ (2.56) ta có:

$$\dot{E}_l = \Psi E_l + C\zeta \quad (2.59)$$

Do Ψ Hurwitz, với mọi ma trận $Q = Q^T > 0$, tồn tại duy nhất ma trận $P = P^T > 0$ thỏa mãn phương trình Lyapunov:

$$\Psi^T P + P\Psi = -Q \quad (2.60)$$

Chọn hàm Lyapunov:

$$V_{22} = E_l^T P E_l \quad (2.61)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian:

$$\dot{V}_{22} = \dot{E}_l^T P E_l + E_l^T P \dot{E}_l \quad (2.62)$$

Kết hợp với (2.59) ta được:

$$\dot{V}_{22} = E_l^T (\Psi^T P + P\Psi) E_l + 2E_l^T P C \zeta \quad (2.63)$$

Do đó:

$$\dot{V}_{22} = -E_l^T Q E_l + 2E_l^T P C \zeta \quad (2.64)$$

Sử dụng bất đẳng thức chuẩn:

$$2E_l^T P C \zeta \leq \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2} \|E_l\|^2 + \frac{2\|PC\|^2}{\lambda_{\min}(Q)} \zeta^2 \quad (2.65)$$

Ta có:

$$\dot{V}_{22} \leq -\frac{\lambda_{\min}(Q)}{2} \|E_l\|^2 + \frac{2\|PC\|^2}{\lambda_{\min}(Q)} \zeta^2 \quad (2.66)$$

Mặt khác:

$$\lambda_{\min}(P) \|E_l\|^2 \leq V_{22} \leq \lambda_{\max}(P) \|E_l\|^2 \quad (2.67)$$

Suy ra:

$$\dot{V}_{22} \leq -\gamma_{21} V_{22} + \gamma_{22} \zeta^2 \leq -\gamma_{21} V_{22} + \gamma_{22} \bar{\zeta}^2 \quad (2.68)$$

trong đó:

$$\gamma_{21} = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\lambda_{\max}(P)} > 0, \gamma_{22} = \frac{2\|PC\|^2}{\lambda_{\min}(Q)} > 0 \quad (2.69)$$

$\lambda_{\min}(\cdot)$, $\lambda_{\max}(\cdot)$ là giá trị riêng nhỏ nhất và giá trị riêng lớn nhất một ma trận đối xứng xác định dương

Từ bất đẳng thức vi phân tuyến tính (2.68), bằng cách nhân 2 vế với $\exp(\gamma_{21}t)$, ta có:

$$\exp(\gamma_{21}t)\dot{V}_{22} + \gamma_{21}\exp(\gamma_{21}t)V_{22} \leq \gamma_{22}\bar{\zeta}^2 \exp(\gamma_{21}t) \quad (2.70)$$

Nghĩa là:

$$\frac{d}{dt}(\exp(\gamma_{21}t)V_{22}) \leq \gamma_{22}\bar{\zeta}^2 \exp(\gamma_{21}t) \quad (2.71)$$

Lấy tích phân (2.71) từ t_0 đến t ta được

$$\exp(\gamma_{21}t)V_{22}(t) - \exp(\gamma_{21}t_0)V_{22}(t_0) \leq \gamma_{22}\bar{\zeta}^2 \int_{t_0}^t \exp(\gamma_{21}\tau) d\tau \quad (2.72)$$

Mặt khác:

$$\gamma_{22}\bar{\zeta}^2 \int_{t_0}^t \exp(\gamma_{21}\tau) d\tau = \gamma_{22}\bar{\zeta}^2 \frac{1}{\gamma_{21}} (\exp(\gamma_{21}t) - \exp(\gamma_{21}t_0)) \quad (2.73)$$

Kết hợp với (2.73), ta suy ra:

$$\begin{aligned} \exp(\gamma_{21}t)V_{22}(t) &\leq \exp(\gamma_{21}t_0)V_{22}(t_0) + \frac{\gamma_{22}}{\gamma_{21}}\bar{\zeta}^2 (\exp(\gamma_{21}t) - \exp(\gamma_{21}t_0)) \\ \Leftrightarrow V_{22}(t) &\leq \exp(-\gamma_{21}(t-t_0))V_{22}(t_0) + \frac{\gamma_{22}}{\gamma_{21}}\bar{\zeta}^2 (1 - \exp(-\gamma_{21}(t-t_0))) \end{aligned} \quad (2.74)$$

Do đó, khi $t \rightarrow \infty$:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} V_{22}(t) \leq \frac{\gamma_{22}}{\gamma_{21}}\bar{\zeta}^2 \quad (2.75)$$

Suy ra:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|E_l(t)\| \leq \sqrt{\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{21}\lambda_{\min}(P)}}\bar{\zeta} \quad (2.76)$$

Vì vậy, $E_l = [\hat{e}_l \quad \hat{e}_{D_l}]^T$ là UUB, với $l = \{v, \omega\}$, ta có $\hat{e}_v, \hat{e}_\omega, \hat{e}_{D_v}, \hat{e}_{D_\omega}$ đều là UUB.

Nếu $\zeta(t) \rightarrow 0$, từ (2.68) ta có $\dot{V}_{22} \leq -\gamma_{21}V_{22} + \gamma_{22}\bar{\zeta}^2$ suy ra $V_{22}(t) \rightarrow 0$

Do đó $E_l(t) \rightarrow 0$, hay

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_v(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_{D_v}(t) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_\omega(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{e}_{D_\omega}(t) = 0$$

Định lý 2.2 được chứng minh.

2.3. Mô phỏng kiểm chứng các bộ quan sát

Để kiểm chứng tính đúng đắn của mô hình toán học cũng như hiệu quả của các bộ quan sát lỗi và bộ quan sát trạng thái mở rộng đã được đề xuất trong các mục trước, một loạt các kịch bản mô phỏng số được thực hiện trên môi trường MATLAB/Simulink. Mục tiêu chính của các mô phỏng là:

- Xác nhận khả năng ước lượng chính xác lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu gộp của các bộ quan sát được thiết kế;
- Đánh giá tốc độ hội tụ, độ chính xác ở trạng thái xác lập và khả năng chống nhiễu của bộ quan sát;
- Kiểm tra tính ổn định và bền vững của bộ quan sát trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu ngoại lai;

Các kịch bản mô phỏng được xây dựng sát với điều kiện vận hành thực tế của NWMR, bao gồm các trường hợp suy giảm hiệu suất truyền động, nhiễu biến thiên chậm và sai lệch mô hình.

2.3.1. Cài đặt mô hình mô phỏng trên MATLAB/Simulink

a) Cấu trúc tổng thể của mô hình mô phỏng

Mô hình mô phỏng được xây dựng trên nền tảng MATLAB/Simulink theo cấu trúc mô-đun đánh giá độc lập từng bộ quan sát, đồng thời thuận tiện cho việc mở rộng sang bài toán điều khiển chịu lỗi ở các chương tiếp theo. Cấu trúc bao gồm các khối chức năng chính sau:

- Khối mô hình động lực học robot (2.30), bao gồm vận tốc tịnh tiến v và vận tốc góc ω .
- Khối lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu gộp mô phỏng các lỗi suy giảm hiệu suất truyền động và nhiễu ngoại lai tác động lên hệ thống, được gộp dưới dạng các nhiễu $D_v(t)$ và $D_\omega(t)$.
- Khối bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành thực hiện các thuật toán quan sát lỗi đã trình bày trong Mục 2.2.1 và Mục 2.2.2, bao gồm bộ quan sát cơ sở và bộ quan sát lỗi cải tiến.
- Khối ESO (2.50), dùng để ước lượng đồng thời trạng thái vận tốc và đồng thời tái tạo nhiễu gộp.
- Khối xử lý và đánh giá kết quả: Ghi nhận, so sánh và hiển thị các tín hiệu thực và ước lượng, phục vụ cho việc phân tích định lượng và trực quan.

b) Cài đặt mô hình động lực học robot

Mô hình động học và động lực học của robot được cài đặt dựa trên phương trình (2.19) và (2.30). Thông số mô hình robot được mô tả trong Bảng 2.1, các tham số của động cơ DC servo mô tả trong Bảng 2.2.

Bảng 2.1. Thông số mô hình robot sử dụng trong mô phỏng

Tham số	Mô tả	Giá trị
$r \text{ (m)}$	Bán kính bánh xe	0.1
$m \text{ (kg)}$	Khối lượng robot	15
$I \text{ (kg.m}^2\text{)}$	Mô men quán tính của robot	2.5
$2h \text{ (m)}$	Khoảng cách giữa hai bánh xe chủ động	0.4

Bảng 2.2. Tham số động cơ sử dụng trong mô phỏng

Tham số	Mô tả	Giá trị
k_τ	Hằng số mô-men xoắn	0.02
k_ε	Hằng số điện động động cơ	0.02
N_m	Tỷ số truyền	16.2
$R_m(\Omega)$	Điện trở phản ứng mỗi động cơ	1

c) Mô phỏng lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu

Thời gian mô phỏng được tiến hành trong 20 giây, lỗi cơ cấu chấp hành ở phần động lực học và các nhiễu loạn chưa biết được mô phỏng thông qua việc đưa các thành phần nhiễu gộp bắt đầu từ giây thứ 10:

$$[D_v \quad D_\omega]^T = [3 \sin(4t + \frac{\pi}{2}) \quad 2 \cos(2.5t + \pi)]^T$$

Lỗi cơ cấu chấp hành cũng được cho tác động từ giây thứ 10 dưới dạng suy giảm hiệu suất truyền động: $\Delta \mathcal{G} = [0.35v \quad 0.25\omega]^T$.

d) Cài đặt bộ quan sát

- Bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành được thiết lập bằng các khối MATLAB Function kết hợp với các khối tích phân, nhằm đảm bảo tính linh hoạt trong việc triển khai các hàm phi tuyến và các thuật toán cải tiến.
- Bộ quan sát trạng thái mở rộng được thiết lập theo hệ phương trình (2.50).

Các tham số của bộ quan sát được thể hiện trên bảng 2.3.

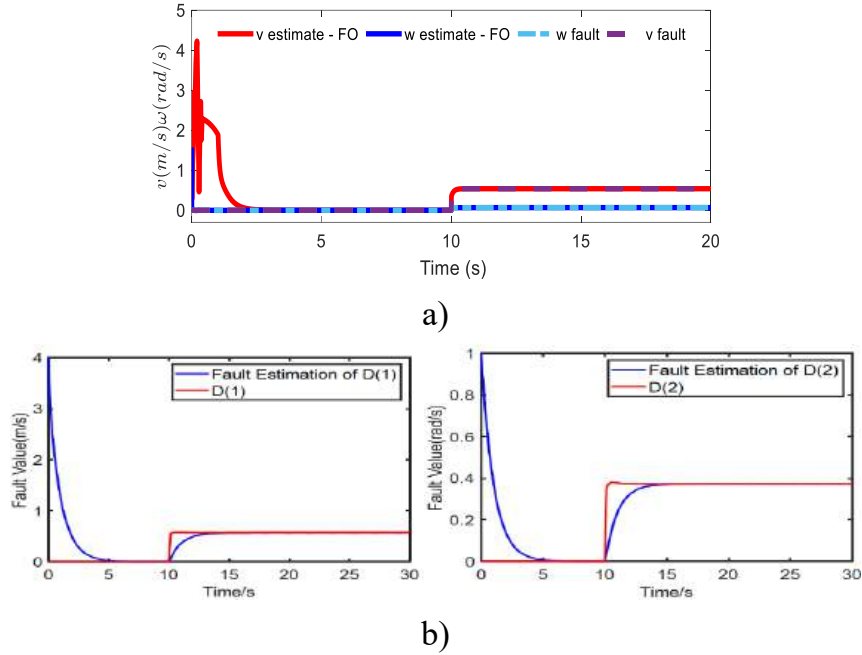
Bảng 2.3. Tham số các bộ quan sát sử dụng trong mô phỏng

Bộ quan sát	Tham số
<i>IFO</i>	$\tau_L = 0.5, T_{init} = 3, \beta_d = 0.01, L_0 = [100 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 100]$
<i>ESO</i>	$\Lambda = 250, \gamma = 0.01, \alpha = 0.5$

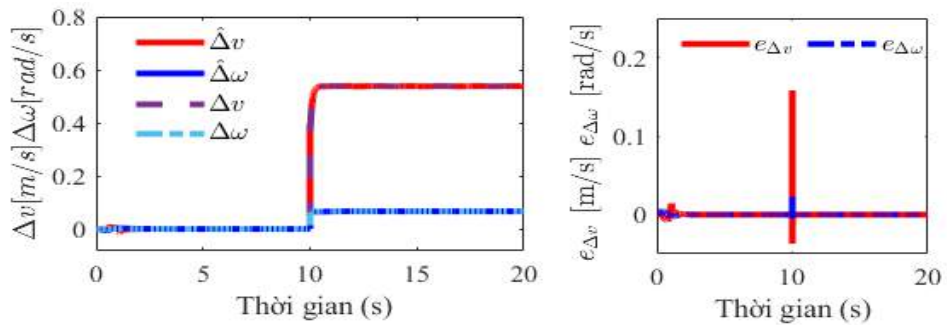
2.3.2. Kết quả mô phỏng và đánh giá

a) Tín hiệu quan sát trên FO và IFO

Căn cứ vào kết quả thể hiện trong Hình 2.3, có thể nhận thấy rằng khi sử dụng bộ quan sát lỗi FO, các tín hiệu ước lượng lỗi vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc xuất hiện quá trình quá độ lớn trong giai đoạn khởi tạo. Về mặt nguyên lý, các giá trị ước lượng này được đưa trực tiếp vào tầng điều khiển động học để thực hiện bù lỗi. Xét trên phương diện lý thuyết, hệ điều khiển tổng thể vẫn đảm bảo tính ổn định tiệm cận theo tiêu chuẩn Lyapunov, điều này cũng đã được kiểm chứng thông qua các kết quả trong các công bố [73]. Tuy nhiên, biên độ quá độ lớn ở giai đoạn đầu của bộ quan sát có thể gây dao động lớn hoặc làm suy giảm chất lượng quá độ ban đầu của robot, từ đó làm kéo dài thời gian xác lập bám quỹ đạo mong muốn. Do đó, hiện tượng quá độ khởi tạo này được xem là một hạn chế đáng kể của bộ quan sát FO truyền thống.



Hình 2.3. Ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành qua vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc từ bộ FO: a) Kết quả của NCS, b) Kết quả trong nghiên cứu [73]

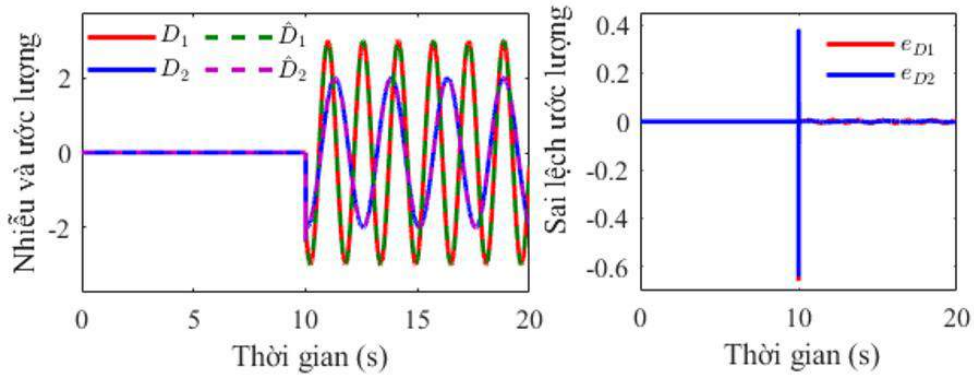


Hình 2.4. Ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành qua vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của bộ IFO

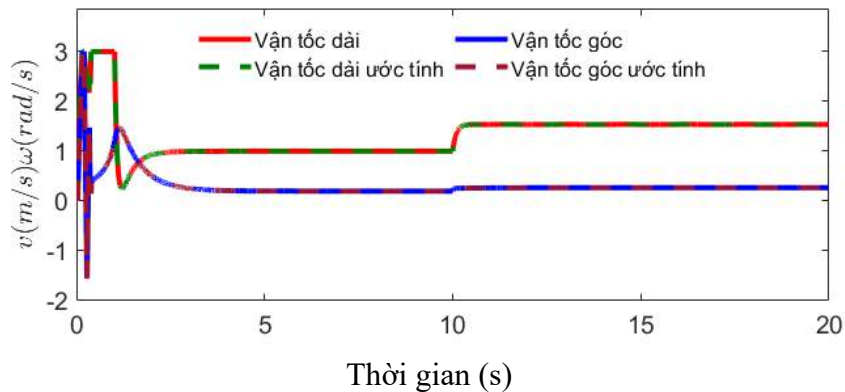
Ngược lại, kết quả trong Hình 2.4 cho thấy bộ quan sát lỗi cải tiến đã khắc phục hiệu quả nhược điểm nêu trên. Cơ chế warm-up hạn chế xung đỉnh và tránh bù lỗi quá mức trong giai đoạn khởi động; sau khi hệ số quan sát được kích hoạt đầy đủ, sai số ước lượng mới hội tụ về miền lân cận không. Sự cải thiện này cho phép nâng cao đáng kể tính ổn định, tốc độ hội tụ và chất lượng đáp ứng tổng thể của hệ thống robot.

b) Tín hiệu quan sát trên ESO

Căn cứ vào các kết quả thể hiện trong Hình 2.5 và Hình 2.6, có thể khẳng định rằng bộ quan sát ESO cho khả năng ước lượng chính xác và tin cậy cả nhiều gộp tác động lên hệ thống lẫn các trạng thái vận tốc của robot. Cụ thể, ở Hình 2.5, tín hiệu nhiều gộp được ước lượng bởi ESO bám sát nhiều thực với sai lệch nhỏ và thời gian hội tụ nhanh, ngay cả khi nhiễu xuất hiện đột ngột và có dạng biến thiên điều hòa. Điều này cho thấy cấu trúc đề xuất cho phép ước lượng ảnh hưởng của lỗi và nhiễu theo hai tầng mô hình động học và động lực học.



Hình 2.5. Ước lượng nhiễu gộp bằng bộ quan sát trạng thái mở rộng



Hình 2.6. Ước lượng vận tốc, vận tốc góc trên bộ quan sát trạng thái mở rộng

Bên cạnh đó, kết quả ở Hình 2.6 cho thấy các giá trị ước lượng vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc hội tụ nhanh về giá trị thực sau một khoảng quá độ ngắn, đồng thời duy trì độ trùng khớp cao trong suốt quá trình hoạt động. Đặc biệt, hiện tượng dao động và sai lệch ở giai đoạn khởi tạo được giới hạn trong biên độ nhỏ và nhanh chóng bị triệt tiêu, đảm bảo tín hiệu ước lượng đủ mượt để sử dụng trực tiếp trong vòng điều khiển.

Với vai trò được tích hợp trong vòng điều khiển động lực học, ESO cung cấp thông tin trạng thái và nhiễu có độ chính xác cao, cho phép bộ điều khiển thực hiện bù nhiễu chủ động và tăng cường tính bền vững của hệ thống. Nhờ đó, chất lượng đáp ứng động lực học của robot được cải thiện rõ rệt, thể hiện qua khả năng ổn định nhanh, giảm dao động và duy trì vận hành ổn định ngay cả khi hệ thống chịu tác động của nhiễu ngoài.

2.4. Kết luận chương 2

Chương 2 của luận án đã xây dựng một khung lý thuyết hoàn chỉnh cho việc mô hình hóa, quan sát và ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành trong NWMR. Trước hết, các mô hình động học và động lực học có xét đến lỗi cơ cấu chấp hành đã được thiết lập một cách tường minh, làm rõ cơ chế xâm nhập của lỗi và nhiễu vào động lực học sai số bám cũng như động lực học vận tốc của robot. Trên cơ sở đó, luận án đã đề xuất cấu trúc quan sát hai tầng, kết hợp bộ quan sát lỗi cơ cấu chấp hành và bộ quan sát trạng thái mở rộng, cho phép ước lượng ảnh hưởng của lỗi và nhiễu theo hai tầng mô hình động học và động lực học.

Các bộ quan sát được thiết kế không chỉ đảm bảo khả năng ước lượng chính xác trong điều kiện bất định và nhiễu bị chặn, mà còn khắc phục được các hạn chế thực tiễn như xung quá độ ban đầu thông qua cơ chế khởi tạo thích nghi. Tính ổn định và hội tụ của sai số quan sát được chứng minh chặt chẽ dựa trên lý thuyết Lyapunov phi tuyến. Những kết quả đạt được trong chương này tạo nền tảng lý thuyết và kỹ thuật vững chắc cho việc phát triển bộ điều khiển chịu lỗi tích hợp quan sát – điều khiển sẽ được trình bày và khai thác trong Chương 3.

Kết quả nghiên cứu trình bày trong chương 2 đã được công bố trong các công trình CT1, CT5, CT8.

[CT1]. **H. S. Phuong**, Ngo Manh Tien*, Ngo Duy Tan, Mai The Anh, Duong Dinh Tu, “*Proposal of a Fault-tolerant controller for wheeled mobile robots with faulty actuators*,” 2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hanoi, Vietnam, pp. 507-512, 2023. DOI: 10.1109/ICCAIS59597.2023.10382286. (SCOPUS)

[CT5]. **Sy Phuong Ho**, Dinh Tu Duong, Van Chuong Le, Van Vy Phan, Hung Cuong Ta, Thanh Tri Nguyen, “*Fault-Tolerant Control for Mobile Robots: Integrating Low-Pass Filters for Improved Actuator Fault Compensation*”, 2025 3rd International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences, Tumakuru, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSSES64899.2025.11009298. (SCOPUS-Q4)

[CT8]. **Sy Phuong Ho**, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Van Du Phan, Dinh Tu Duong, Van Vy Phan, “*Hybrid Fault-Tolerant Adaptive Controller for Robust Trajectory Tracking of Mobile Robots*”, Transactions of the Institute of Measurement and Control, pp. 1-11, 2026. <https://doi.org/10.1177/0142331226144986> (SCIE-Q2)

CHƯƠNG 3.

KIẾN TRÚC ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI PHÂN TẦNG DỰA TRÊN CÁC BỘ QUAN SÁT CHO NWMR

Trong Chương 2, luận án đã xây dựng mô hình động học và động lực học của robot di động non-holonomic trong điều kiện tồn tại nhiễu gộp, bất định tham số và lỗi cơ cấu chấp hành, đồng thời đề xuất các cấu trúc bộ quan sát phi tuyến nhằm ước lượng trạng thái, nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành. Các kết quả thu được cho thấy rằng việc tích hợp bộ quan sát vào kiến trúc điều khiển đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao độ tin cậy và khả năng chịu lỗi của hệ thống.

Tuy nhiên, các bộ quan sát chỉ cung cấp thông tin ước lượng; để khai thác hiệu quả các thông tin này trong bài toán bám quỹ đạo, cần thiết phải thiết kế các bộ điều khiển chịu lỗi phù hợp, có khả năng bù trừ chủ động ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành, duy trì ổn định toàn cục và đảm bảo chất lượng điều khiển trong điều kiện nhiễu và bất định mạnh.

Xuất phát từ yêu cầu đó, Chương 3 tập trung vào việc tổng hợp và phát triển các chiến lược điều khiển chịu lỗi cho NWMR trên cơ sở kế thừa và mở rộng các kết quả quan sát đã xây dựng ở Chương 2. Các bộ điều khiển được trình bày không chỉ khai thác thông tin từ bộ quan sát, mà còn gắn liền với việc cải tiến cấu trúc và vai trò của các bộ quan sát lỗi và nhiễu nhằm nâng cao hiệu quả bù lỗi và độ bền vững của hệ thống.

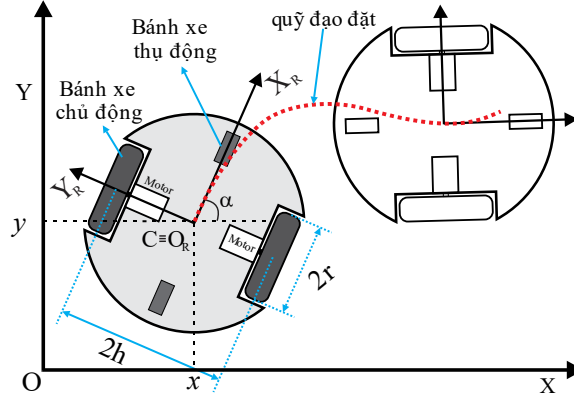
3.1. Điều khiển chịu lỗi cho NWMR dựa trên i-PID và bộ quan sát lỗi

Trong mục này NCS đề xuất một cấu trúc điều khiển bám quỹ đạo chịu lỗi cho robot tự hành non-holonomic, trong đó ý tưởng cốt lõi không nhằm thay thế bộ điều khiển bám quỹ đạo động học truyền thống, mà tập trung vào tăng cường khả năng chịu lỗi và tính thích nghi ở mức động lực học. Cụ thể, bộ điều khiển được tổng hợp dựa trên ba thành phần chính: (i) bộ điều khiển bám quỹ đạo động học dùng để sinh vận tốc tham chiếu; (ii) bộ điều khiển i-PID dựa trên mô hình siêu cục bộ nhằm tránh phụ thuộc vào mô hình động lực học chính xác; (iii) bộ quan sát lỗi dùng để ước lượng trực tuyến ảnh hưởng của sai lệch mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành, từ đó cho phép bù lỗi chủ động trong vòng điều khiển trong. Điểm mới của phương pháp đề xuất nằm ở việc kết hợp điều khiển i-PID với bộ quan sát lỗi trong cấu trúc hai vòng, cho phép xử lý đồng thời sai lệch mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành mà không cần mô hình động lực học chính xác của robot.

Với cấu trúc này, bài toán điều khiển bám quỹ đạo được tách thành các khối chức năng rõ ràng, cho phép vừa đảm bảo tính ổn định của hệ thống, vừa nâng cao độ bền vững trước các bất định và lỗi không thể tránh khỏi trong môi trường thực.

3.1.1. Bộ điều khiển động học bám quỹ đạo

Hình 3.1 thể hiện cấu trúc và quỹ đạo chuyển động của robot theo quỹ đạo mong muốn.



Hình 3.1. Mô tả cấu trúc và chuyển động của NWMR

Xét quỹ đạo chuyển động của robot được chia thành n đoạn rất nhỏ có độ dài $\Delta l > 0$. Với $P(x, y)$ là tọa độ hiện tại của robot, ta có thể xác định chính xác tọa độ điểm $P_1(x_1, y_1)$ sau khi robot di chuyển một đoạn Δl như sau [20], [38]:

$$\begin{cases} x_1 = x + \Delta l \cos \theta \\ y_1 = y + \Delta l \sin \theta \end{cases} \quad (3.1)$$

Do đó, bài toán bám quỹ đạo của robot có thể được thay thế bằng bài toán điều khiển điểm $P_1(x_1, y_1)$ bám theo quỹ đạo đặt $q_d = [x_d \ y_d \ \theta_d]^T$.

Lấy đạo hàm theo thời gian của (3.1) và kết hợp với mô hình động học (2.3), ta thu được [20],[38]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\Delta l \sin \theta \\ \sin \theta & \Delta l \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Suy ra:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{\Delta l} & \frac{\cos \theta}{\Delta l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1c} \\ u_{2c} \end{bmatrix}; (\dot{x}_1 = u_{c1}, \dot{y}_1 = u_{c2}) \quad (3.3)$$

Tín hiệu điều khiển bám quỹ đạo được chọn:

$$\begin{cases} u_{c1} = \dot{x}_{1d} + k_{31}(x_{1d} - x_1) \\ u_{c2} = \dot{y}_{1d} + k_{32}(y_{1d} - y_1) \end{cases} \quad (3.4)$$

Trong đó u_{c1}, u_{c2} là các tín hiệu điều khiển trung gian, tương ứng với tốc độ biến thiên của tọa độ điểm điều khiển P_1 . x_{1d}, y_{1d} là tọa độ trạng thái tiếp theo mong muốn, tương ứng với quỹ đạo tham chiếu: $x_{1d} = x_d + \Delta l \cos \theta_d$, $y_{1d} = y_d + \Delta l \sin \theta_d$.

$k_{31}, k_{32} > 0$ là các hệ số điều khiển, quyết định tốc độ hội tụ của sai số. $e_{1x} = x_{1d} - x_1$, $e_{1y} = y_{1d} - y_1$ là sai số bám giữa trạng thái tiếp theo mong muốn và trạng thái thực tế.

Tín hiệu điều khiển theo vận tốc và vận tốc góc đề xuất:

$$\begin{cases} v = k_{31}e_{1x} \cos \theta + k_{32}e_{1y} \sin \theta + \dot{x}_{1d} \cos \theta + \dot{y}_{1d} \sin \theta \\ \omega = \frac{1}{\Delta l} (-k_{31}e_{1x} \sin \theta + k_{32}e_{1y} \cos \theta - \dot{x}_{1d} \sin \theta + \dot{y}_{1d} \cos \theta) \end{cases} \quad (3.5)$$

Mô hình động lực học của robot được biểu diễn dưới dạng mô hình danh định đơn giản hóa:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{h}{I} & \frac{-h}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Lỗi cơ cấu chấp hành được xem xét dưới dạng làm suy giảm hiệu suất của các bộ chấp hành trên hai động cơ của robot. Khi đó, mô hình động lực học của robot có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{1}{m + \Delta m} & \frac{1}{m + \Delta m} \\ \frac{h}{I + \Delta I} & \frac{-h}{I + \Delta I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 - \Delta \tau_1 \\ \tau_2 - \Delta \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Trong đó, vector nhiễu đầu vào không xác định $\Delta \tau = [\Delta \tau_1 \quad \Delta \tau_2]^T$ biểu diễn lỗi cơ cấu chấp hành tác động lên robot di động, đồng thời sai lệch các tham số Δm và ΔI giả thiết tồn tại chưa biết trong quá trình mô hình hóa robot. Do ảnh hưởng của các lỗi này, các giá trị của vận tốc tịnh tiến v và vận tốc góc ω sẽ thay đổi bởi các đại lượng không xác định lần lượt là Δv và $\Delta \omega$.

3.1.2. Bộ điều khiển động lực học dựa trên i-PID và điều khiển phi mô hình

Theo lý thuyết điều khiển phi mô hình và mô hình siêu cục bộ được trình bày trong [72], đồng thời được tổng hợp trong [71], động lực học phi tuyến chưa biết của hệ thống được biểu diễn dưới dạng:

$$y_{MFC}^{(i)} = F_g + A_h u_{ctr} \quad (3.8)$$

trong đó $y_{MFC}^{(i)}$ là đạo hàm bậc $i \geq 1$ của y_{MFC} , $y_{MFC}^{(i)} \in R^n$, $u_{ctr} \in R^n$ là tín hiệu điều khiển, $A_h \in R^{n \times n}$ là ma trận hằng số, F_g là đại lượng gộp phản ánh ảnh hưởng của động lực học chưa biết, nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành, được ước lượng trực tuyến.

Xét hệ động lực học trong (3.7) khi biểu diễn dưới dạng (3.8), ta có:

$$\dot{\mathcal{G}} = F_g + A_h u_{ctr} \quad (3.9)$$

Trong đó:

$$u_{ctr} = [\tau_1 \quad \tau_2]^T, \Delta u_{ctr} = [\Delta \tau_1 \quad \Delta \tau_2]^T$$

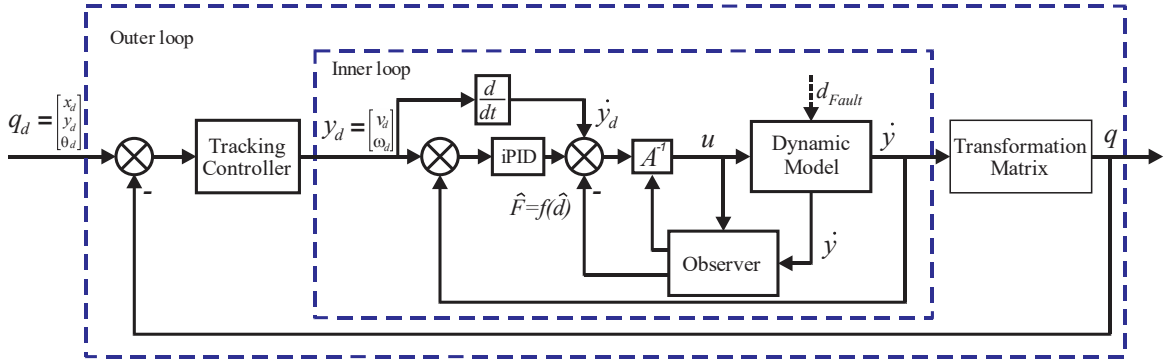
$$A_h = \begin{bmatrix} \frac{1}{rm} & \frac{1}{rm} \\ \frac{h}{rI} & -\frac{h}{rI} \end{bmatrix}, F_g = f(m, I, \Delta m, \Delta I, u, \Delta u)$$

Mở rộng luật i-PID trong [72] cho hệ MIMO có ma trận phân bố đầu vào A_h , tín hiệu điều khiển được chọn như sau:

$$u_{ctr} = A_h^{-1}(\dot{\mathcal{G}}_d - \hat{F}_g + k_p e_g + k_i \int e_g dt + k_d \dot{e}_g) \quad (3.10)$$

trong đó k_p, k_i, k_d là các hệ số của bộ điều khiển i-PID; $\hat{F}_g$ là ước lượng của F_g từ bộ quan sát; $\mathcal{G}_d$ là vận tốc tham chiếu; $e_g = \mathcal{G}_d - \mathcal{G}$ là sai lệch.

Cấu trúc tổng thể của bộ điều khiển được trình bày trong Hình 3.2, bao gồm vòng ngoài bám quỹ đạo và vòng trong điều khiển động lực học kết hợp i-PID và bộ quan sát.



Hình 3.2. Cấu trúc bộ điều khiển MFC-iPID-FO đề xuất

Định lý 3.1: Xét hệ kín tầng động lực học được mô tả bởi (3.9) dưới luật điều khiển MFC-i-PID (3.10). Nếu sai số ước lượng $\tilde{F}_g = \hat{F}_g - F_g$ bị chặn thì sai số bám vận tốc e_g của vòng trong là UUB. Nếu $\tilde{F}_g(t) \rightarrow 0$ thì sai số e_g hội tụ tiệm cận về không.

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov ứng viên:

$$V_{31} = \frac{1}{2} \left(e_g^T (e_g + k_d e_g) + \Omega^T k_i \Omega \right), \Omega = \int e_g dt \quad (3.11)$$

Lấy đạo hàm $V_{31}(t)$ theo thời gian, kết hợp với (3.9) ta được:

$$\dot{V}_{31} = e_g^T (\dot{\mathcal{G}}_d - F_g - A_h u_{ctr}) + e_g^T k_d \dot{e}_g + e_g^T k_i \int e_g dt \quad (3.12)$$

Thay luật điều khiển MFC-iPID (3.10) vào (3.12), ta thu được:

$$\dot{V}_{31} = -e_g^T(k_p e_g + e_F) = -k_p \|e_g\|^2 - e_g^T e_F \leq -k_p \|e_g\|^2 + |e_g^T e_F| \quad (3.13)$$

Áp dụng bất đẳng thức Young/Cauchy ta có: $|e_g^T e_F| \leq \frac{k_p}{2} \|e_g\|^2 + \frac{1}{2k_p} \|e_F\|^2$

$$\text{Do đó } \dot{V}_{31} \leq -k_p \|e_g\|^2 + \frac{k_p}{2} \|e_g\|^2 + \frac{1}{2k_p} \|e_F\|^2 = -\frac{k_p}{2} \|e_g\|^2 + \frac{1}{2k_p} \|e_F\|^2$$

Vì sai số ước lượng e_F của bộ quan sát bị chặn và hội tụ về 0, nên hệ sai số là UUB. Hơn nữa, khi $t \rightarrow \infty$ thành phần $\|e_F\|^2 \leq \varepsilon_F$, nếu chọn ε_F đủ nhỏ $\dot{V}_{31}$ trở nên âm xác định từ một thời điểm đủ lớn. Vì $\tilde{F}_g$ bị chặn nên sai số bám vận tốc là UUB. Khi $\tilde{F}_g(t) \rightarrow 0$, đạo hàm hàm Lyapunov trở nên âm xác định sau một khoảng thời gian hữu hạn; do đó sai số bám vận tốc hội tụ tiệm cận về không [64].

Nhận xét 3.1: Luật điều khiển (3.10) yêu cầu tín hiệu ϑ_d , tương ứng với đạo hàm bậc hai của quỹ đạo vị trí tham chiếu. Do đó, quỹ đạo tham chiếu được giả thiết đủ trơn. Trong triển khai thực tế, ϑ_d có thể được xác định bằng bộ lọc hoặc bộ vi phân phù hợp, yêu cầu này không phụ thuộc vào việc ước lượng $\hat{F}_g$.

3.1.3. Mô phỏng và đánh giá

a) Thiết lập mô phỏng

Trong tiểu mục này, các kết quả mô phỏng thu được từ bộ điều khiển đề xuất kết hợp bộ quan sát lỗi được trình bày và phân tích. Các tham số mô phỏng được liệt kê trong Bảng 2.1.

Quỹ đạo mong muốn được chọn:

$$q_d = [x_d \quad y_d \quad \theta_d]^T = [5\cos(0.3t) \quad 5\sin(0.3t) \quad 0.3t + 0.5\pi]^T \quad (3.14)$$

Trạng thái ban đầu của robot: $x(0) = 0, y(0) = 0, \theta(0) = 0$.

Để chứng minh tính khả thi và hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, các bộ điều khiển PID và i-PID không sử dụng bộ quan sát lỗi được đưa vào so sánh trong mô phỏng. Các tham số điều khiển tương ứng được liệt kê trong Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Các tham số của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO

Bộ điều khiển	Các tham số điều khiển
PID	$k_{Pv} = 12, k_{Iv} = 0.1, k_{Dv} = 0.01;$ $k_{P\omega} = 12, k_{I\omega} = 0.1, k_{D\omega} = 0.01; k_{31} = 5, k_{32} = 5$
i-PID	$k_{Pv} = 12, k_{Iv} = 0.1, k_{Dv} = 0.01;$ $k_{P\omega} = 12, k_{I\omega} = 0.1, k_{D\omega} = 0.01; k_{31} = 5, k_{32} = 5$
MFC-iPID-FO	$k_p = 12, k_i = 0.1, k_d = 0.01; k_{31} = 5, k_{32} = 5; k_{FO} = 200$

Các tham số điều khiển trong Bảng 3.1 được xác định thông qua quá trình tinh chỉnh lặp (iterative tuning) trong môi trường MATLAB/Simulink nhằm đảm bảo tính ổn định của hệ thống và giảm thiểu sai số bám quỹ đạo. Phân tích độ nhạy cho thấy rằng các thay đổi nhỏ ($\pm 10\%$) của các tham số này chỉ gây ra những biến đổi không đáng kể trong sai số bám, trong khi các sai lệch lớn hơn có thể dẫn đến hiện tượng hội tụ chậm hoặc dao động.

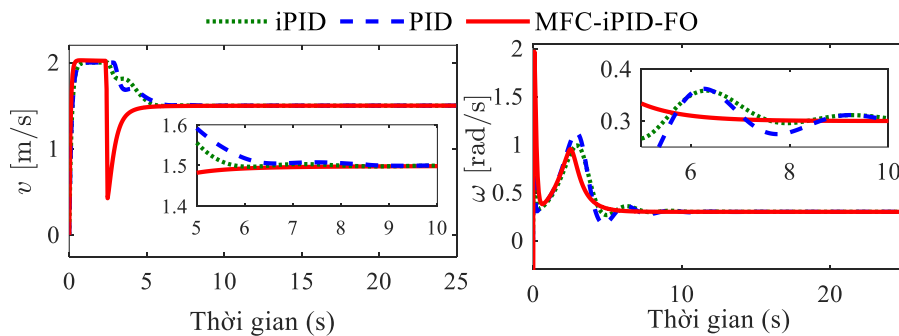
Hệ số khuếch đại của bộ quan sát k_{FO} được lựa chọn nhằm cân bằng giữa khả năng ước lượng lỗi nhanh và khả năng khử nhiễu đo.

Để đảm bảo tính khách quan của kết quả đánh giá, các bộ điều khiển được mô phỏng trong cả hai trường hợp:

1. Chỉ tồn tại sai số mô hình, không có lỗi cơ cấu chấp hành
2. Đồng thời tồn tại sai số mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành.

b. Kết quả mô phỏng

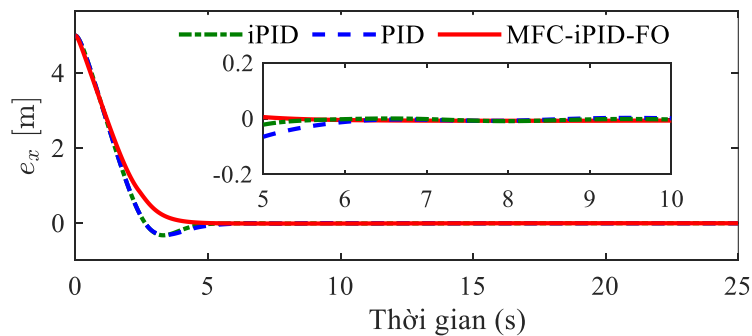
➤ *Trường hợp 1 (TH1):* Trước hết, ba bộ điều khiển được so sánh và đánh giá trong bài toán bám quỹ đạo dưới điều kiện không có lỗi cơ cấu chấp hành. Như thể hiện trong các Hình 3.3 – 3.5, bộ điều khiển đề xuất đạt được sai số bám nhỏ nhất, thời gian đáp ứng nhanh hơn và hiệu năng vượt trội so với hai bộ điều khiển còn lại. Trong khi đó, bộ điều khiển PID và i-PID không sử dụng bộ quan sát cho kết quả kém hơn do không có cơ chế ước lượng và bù thành phần bất định gộp/sai lệch mô hình.



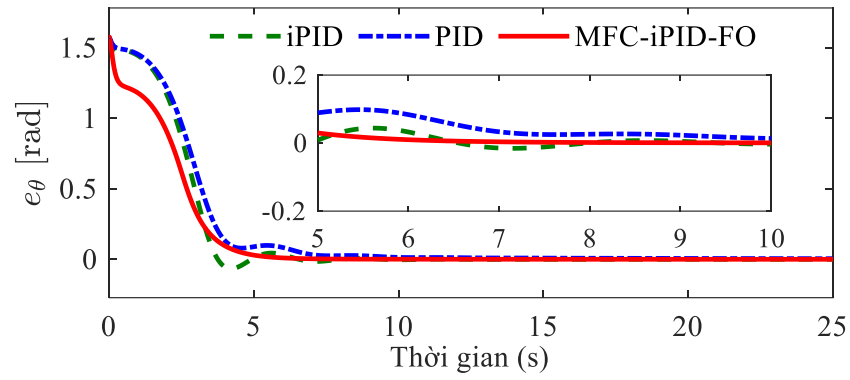
a) Vận tốc tịnh tiến

b) Vận tốc góc

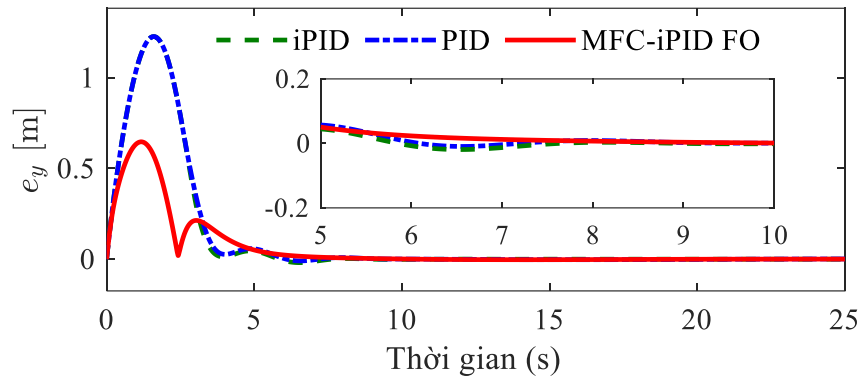
Hình 3.3. Tín hiệu điều khiển của PID, iPID, MFC-iPID-FO trong trường hợp 1



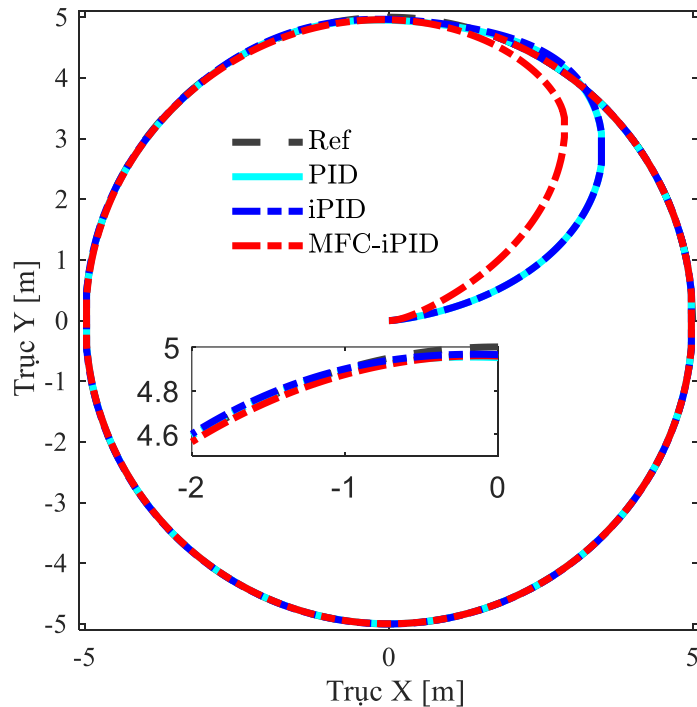
a) Sai lệch theo trục X



b) Sai lệch theo trục Y



c) Sai lệch theo góc hướng

Hình 3.4. Sai lệch bám quỹ đạo theo trục x, y và góc θ 

Hình 3.5. Quỹ đạo bám của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO trong TH1.

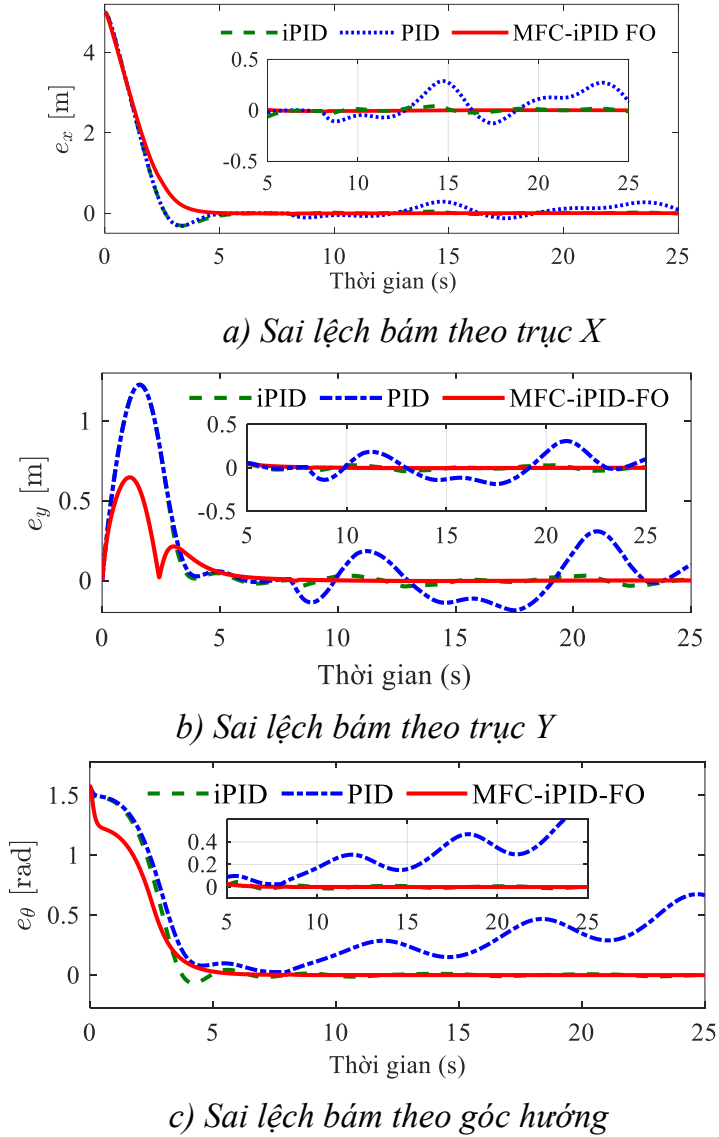
Các kết quả mô phỏng trong Hình 3.3 – 3.5 chứng minh rõ ràng hiệu quả vượt trội của bộ điều khiển đề xuất so với các phương pháp đối chứng.

➤ Trường hợp 2 (TH2):

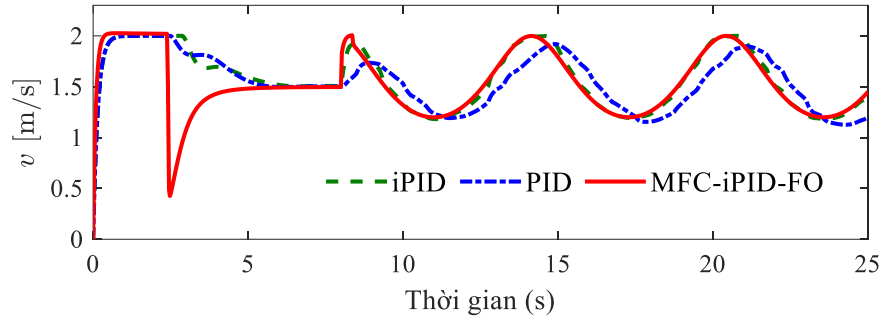
Trong kịch bản thứ hai, lỗi cơ cấu chấp hành được đưa vào hệ thống tại thời điểm $t = 8s$ với $\Delta v = 0.25v \sin(t)$, $\Delta \omega = 0.3\omega$ đồng thời các tham số của robot như khối lượng m và mô-men quán tính I cũng thay đổi theo thời gian ($m = m_0 + 5 \cdot \sin(t)$; $I = I_0 + 0.5 \cdot \cos(t)$). Các Hình 3.6 - 3.9 trình bày kết quả mô phỏng tương ứng.

Kết quả sai số bám trên hình 3.6 cho thấy bộ điều khiển đề xuất vẫn duy trì được sai lệch nhỏ sau khi lỗi xảy ra, trong khi các bộ điều khiển PID và i-PID không sử dụng bộ quan sát lỗi xuất hiện sai số dư lớn hơn và thời gian phục hồi dài hơn trên tất cả các trạng thái.

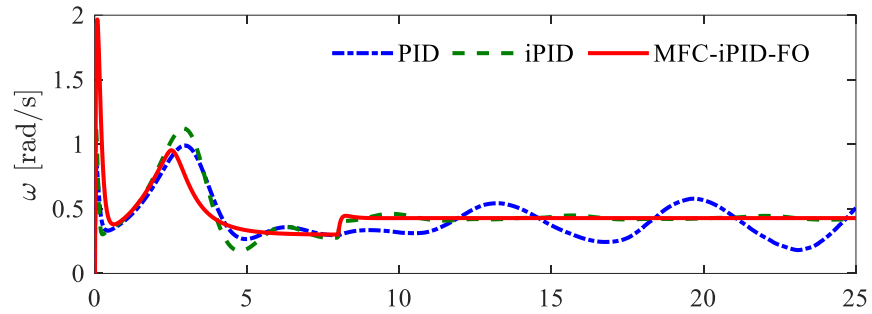
Các tín hiệu điều khiển tương ứng được thể hiện trong Hình 3.7, trong đó phương pháp đề xuất tạo ra các điều chỉnh mượt hơn, với độ quá điều chỉnh nhỏ, trong khi các bộ điều khiển chuẩn xuất hiện các biến thiên đột ngột và dao động mạnh sau khi xảy ra lỗi.



Hình 3.6. Sai lệch bám của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO khi có lỗi cơ cấu chấp hành

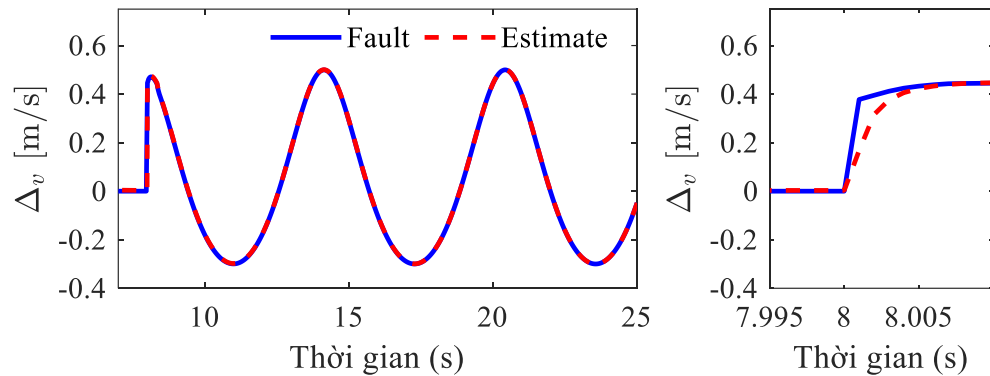


a) Tín hiệu vận tốc tịnh tiến

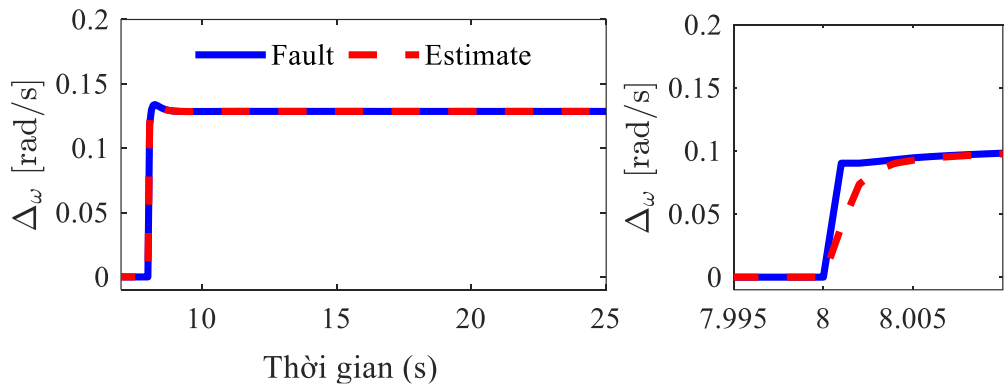


b) Tín hiệu vận tốc góc

Hình 3.7. Tín hiệu vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của các bộ điều khiển PID, iPID, MFC-iPID-FO

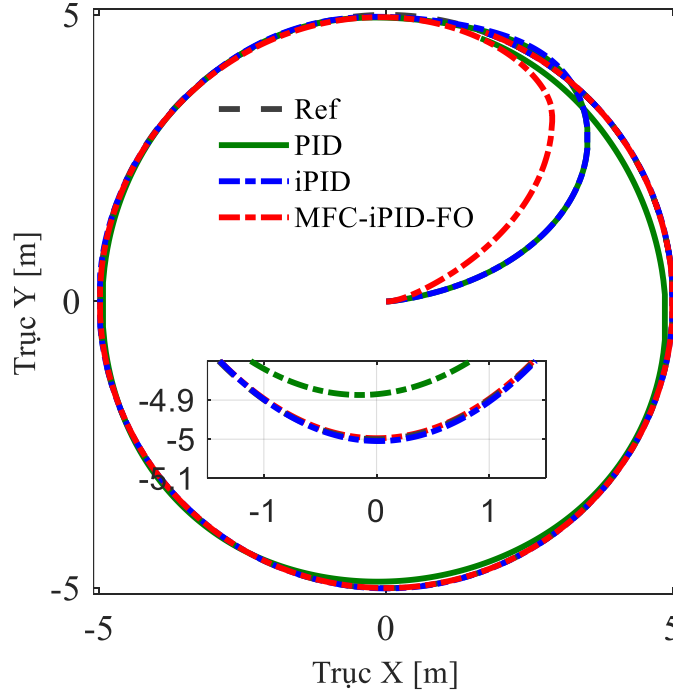


a) Ước lượng lỗi vận tốc tịnh tiến



b) Ước lượng lỗi vận tốc góc

Hình 3.8. Kết quả ước lượng lỗi trên NWMR



Hình 3.9. Quỹ đạo tám của robot trong trường hợp 2

Hình 3.8 minh họa vai trò của bộ quan sát lỗi. Các lỗi ước lượng $\Delta\hat{v}$ và $\Delta\hat{\omega}$ hội tụ nhanh về giá trị thực, với thời điểm phát hiện lỗi vào khoảng 8.007 s tương ứng với độ trễ phát hiện khoảng 0.007s. Việc ước lượng chính xác này cho phép bù lỗi hiệu quả trong vòng điều khiển trong. Hình 3.9 xác nhận rằng bộ điều khiển đề xuất vẫn duy trì được độ chính xác bám quỹ đạo cao ngay cả khi tồn tại suy giảm cơ cấu chấp hành và biến thiên tham số, trong khi các phương pháp đối chứng xuất hiện sai lệch đáng kể.

Đánh giá: Các kết quả đạt được cho thấy rằng việc kết hợp điều khiển phi mô hình MFC-iPID với bộ quan sát lỗi cho phép nâng cao đáng kể khả năng bám quỹ đạo và bù lỗi cơ cấu chấp hành của NWMR, ngay cả khi mô hình động lực học không đảm bảo sự chính xác.

3.2. Điều khiển trượt chịu lỗi cho NWMR dựa trên cấu trúc quan sát kép

Phần này trình bày bộ điều khiển trượt có hỗ trợ bởi hai bộ quan sát (DOA-SMC) được đề xuất cho bài toán bám quỹ đạo chịu lỗi của NWMR (Hình 3.10). Cấu trúc điều khiển tích hợp HiGO để tái cấu trúc vận tốc, FO để ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành, và bộ điều khiển trượt thích nghi nhằm đảm bảo bám quỹ đạo bền vững.

3.2.1. Bộ quan sát mở rộng hệ số khuếch đại cao

Đặt $z_1 = q$, $z_2 = \vartheta$, khi đó hệ thống NWMR được biểu diễn:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = Sz_2 \\ \dot{z}_2 = B\tau + D \end{cases} \quad (3.15)$$

Đề (3.19) có các trị riêng âm, lựa chọn $s_1 = -1; s_2 = -2$. Khi đó ta thu được $\gamma_1 = 2, \gamma_2 = 3$.

Để đảm bảo tính ổn định của bộ quan sát, ma trận Y được chọn sao cho tất cả các trị riêng của (3.19) có phần thực âm. Nói cách khác, Y là ma trận Hurwitz. Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, với mọi ma trận xác định dương cho trước $Q = Q^T > 0$, tồn tại duy nhất một ma trận đối xứng xác định dương $P = P^T > 0$ thỏa mãn phương trình Lyapunov sau:

$$Y^T P + P Y = -Q \quad (3.20)$$

Để phân tích tính ổn định của động học sai số quan sát trong (3.16), hàm Lyapunov sau được đề xuất:

$$V_{321} = \chi^T P \chi \quad (3.21)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian của (3.21), ta thu được:

$$\dot{V}_{321} = \varepsilon \dot{\chi}^T P \chi + \varepsilon \chi^T P \dot{\chi} = \frac{1}{\varepsilon} \chi^T \left(Y^T P + P Y \right) \chi + \frac{2}{\varepsilon} \chi^T P \Upsilon(t) \quad (3.22)$$

Thay động học sai số từ (3.18) và (3.20) vào, ta thu được:

$$\dot{V}_{321} = -\frac{1}{\varepsilon} \chi^T Q \chi + \frac{2}{\varepsilon} \chi^T P \Upsilon(t) \leq -\frac{\lambda_{\min}(Q)}{\varepsilon} \|\chi\|^2 + \frac{2\|P\|\bar{\Upsilon}}{\varepsilon} \|\chi\| \quad (3.23)$$

trong đó $\lambda_{\min}(Q)$ là giá trị riêng nhỏ nhất của ma trận Q .

Bất đẳng thức này xác nhận rằng sai số quan sát χ là bị chặn UUB và thỏa mãn:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\chi(t)\| \leq \frac{2\|P\|\bar{\Upsilon}}{\lambda_{\min}(Q)} \quad (3.24)$$

Bộ quan sát đảm bảo các sai số ước lượng luôn bị chặn trong điều kiện các thành phần nhiễu và bất định là hữu hạn. Tham số ε quyết định thang thời gian của động học bộ quan sát; giá trị ε nhỏ hơn dẫn đến hội tụ nhanh hơn của sai số ước lượng. Nếu $\Upsilon(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$ thì $\chi(t) \rightarrow 0$.

3.2.2. Điều khiển trượt thích nghi trên cơ sở bộ quan sát HiGO

a) Luật điều khiển động học

Trên cơ sở mô hình sai số bám quỹ đạo của robot dưới ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành đã chỉ ra ở tiểu mục 2.1.2. Kết hợp với bộ quan sát lỗi cải tiến thể hiện trong (2.37). Luật điều khiển động học cho robot được đề xuất:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \cos \theta_e + k_x x_e + \Delta \hat{v} \\ \omega_d + k_y v_d y_e + k_\theta \sin \theta_e + \Delta \hat{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

b) Luật điều khiển động lực học

Đặt $z_{1d} = q_d$, $z_{2d} = \dot{q}_d$, $e_{z_1} = z_1 - z_{1d}$, $e_{z_2} = z_2 - z_{2d}$. Khi đó, hệ sai số được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{e}_{z_1} = Se_{z_2} \\ \dot{e}_{z_2} = -S^\dagger \ddot{q}_d + Bu + D \end{cases} \quad (3.26)$$

Ký hiệu biến trượt và biến trượt quan sát lần lượt là:

$$\begin{cases} \delta = e_{z_2} + \lambda e_{z_1} \\ \hat{\delta} = \dot{e}_{z_2} + \lambda \dot{e}_{z_1} \end{cases}, \lambda > 0 \quad (3.27)$$

trong đó $\hat{e}_{z_1} = \hat{z}_1 - z_{1d}$, $\hat{e}_{z_2} = \hat{z}_2 - z_{2d}$

Do đó, ta có:

$$\dot{\delta} = \dot{e}_{z_2} + \lambda \dot{e}_{z_1} = -S^\dagger \ddot{q}_d + Bu + \lambda Se_{z_2} + D \quad (3.28)$$

Luật điều khiển được thiết kế như sau:

$$u = B^{-1} \left(S^\dagger \ddot{q}_d - \lambda S \hat{e}_{z_2} - \lambda_{sw} \tanh(\hat{\delta}) \right) \quad (3.29)$$

trong đó $\lambda_{sw} > \gamma_d > 0$.

Để đảm bảo điều kiện trượt được duy trì trong sự hiện diện của các bất định và nhiễu không thể tránh khỏi trong các hệ thống thực tế, một thành phần điều khiển gián đoạn được đưa vào. Theo đó, bộ điều khiển được sửa đổi với sự bổ sung của hệ số chuyển mạch thích nghi $\hat{\lambda}_{sw}$:

$$u = B^{-1} \left(S^\dagger \ddot{q}_d - \lambda S \hat{e}_{z_2} - \hat{\lambda}_{sw} \tanh(\hat{\delta}) \right) \quad (3.30)$$

Bằng cách định nghĩa sai số ước lượng là $e_\lambda = \lambda_{sw} - \hat{\lambda}_{sw}$, luật điều khiển SMC-PI dựa trên HiGO cuối cùng có thể được đề xuất:

$$\begin{cases} u = B^{-1} \left(S^\dagger \ddot{q}_d - \lambda S \hat{e}_{z_2} - \hat{\lambda}_{sw} \tanh(\hat{\delta}) \right) \\ \dot{\hat{\lambda}}_{sw} = \lambda_{sw} \left| \hat{\delta} \right| \left(1 + \frac{2}{e_\lambda \pi} \left| \text{atan2}(\xi, \hat{\delta}) \right| \right) \end{cases} \quad (3.31)$$

trong đó $\xi > 0$ là một hằng số đủ nhỏ được đưa vào nhằm đảm bảo tính bền vững của điều kiện ổn định.

3.2.3. Phân tích ổn định

Bổ đề 3.1: Xét hệ kín tăng động lực học của cấu trúc DOA-SMC, gồm mô hình (3.26), bộ HiGO (3.16) và luật điều khiển trượt thích nghi (3.31). Giả sử các sai số ước lượng vận tốc và nhiễu là bị chặn. Khi đó có thể lựa chọn các tham số điều khiển sao cho biến trượt δ của vòng trong là UUB.

Chứng minh:

Chứng minh tuân theo lập luận Lyapunov tiêu chuẩn bằng cách xét riêng rẽ ảnh hưởng của lỗi chấp hành và nhiễu bên ngoài. Lỗi chấp hành được bù bởi bộ quan sát lỗi, trong khi ảnh hưởng của nhiễu ngoài bị chặn được bù/khống chế bởi thành phần bền vững của bộ điều khiển trượt. Do các sai số ước lượng là bị chặn, biến trượt hội tụ về một tập dư, kích thước của tập này phụ thuộc vào các cận sai số và các hệ số điều khiển đã chọn.

Định lý 3.2: Xét hệ kín tăng động học của NWMR được mô tả bởi phương trình động học sai số tám (2.8) với bộ quan sát lỗi (2.37), và luật điều khiển được xác định như trong phương trình (3.25). Giả sử $k_x, k_y, k_\theta > 0$, vận tốc tham chiếu $v_d(t)$ bị chặn và tồn tại $v_{min} > 0$ sao cho $v_d(t) \geq v_{min}$. Nếu các sai số ước lượng lỗi $\Delta v = \Delta v - \Delta v$ và

$\Delta \omega = \Delta \omega - \Delta \omega$ bị chặn thì các sai số tám của tăng động học là bị chặn cuối cùng đồng đều. Nếu $\Delta v(t) \rightarrow 0$, $\Delta \omega(t) \rightarrow 0$, $t \rightarrow \infty$, thì trong miền $|\theta_e| < \pi$, điểm cân bằng $e_q = [x_e, y_e, \theta_e]^T = 0$ là ổn định tiệm cận. Các sai số tám x_e , y_e và θ_e hội tụ về 0 khi $t \rightarrow \infty$.

Chứng minh

Thay luật điều khiển (3.25) vào mô hình sai số tám có xét đến lỗi cơ cấu chấp hành (2.8), hệ kín tăng động học trở thành

$$\begin{cases} \dot{x}_e = -k_x x_e + (\omega_d + k_y v_d y_e + k_\theta \sin \theta_e) y_e - y_e \Delta \omega + \Delta v \\ \dot{y}_e = -(\omega_d + k_y v_d y_e + k_\theta \sin \theta_e) x_e + x_e \Delta \omega + v_d \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = -k_y v_d y_e - k_\theta \sin \theta_e + \Delta \omega \end{cases}$$

Xét hàm Lyapunov

$$V_{322} = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + \frac{1 - \cos \theta_e}{k_y} \quad (3.32)$$

Với $k_y > 0$, $V_{322} \geq 0$ và $V_{322} = 0$ tại $x_e = y_e = \theta_e = 0$ trong miền $|\theta_e| < \pi$.

Lấy đạo hàm V_{322} theo thời gian ta được:

$$\dot{V}_{322} = x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{\sin \theta_e}{k_y} \dot{\theta}_e \quad (3.33a)$$

Thay động học hệ kín ở trên và rút gọn các hạng chéo, thu được

$$\dot{V}_{322} = -k_x x_e^2 - \frac{k_\theta}{k_y} \sin^2 \theta_e + x_e \Delta v + \frac{\sin \theta_e}{k_y} \Delta \omega \quad (3.33b)$$

Áp dụng bất đẳng thức Young:

$$x_e \Delta v \leq \frac{k_x}{2} x_e^2 + \frac{1}{2k_x} \Delta v^2; \frac{1}{k_y} |\sin \theta_e| |\Delta \omega| \leq \frac{k_\theta}{2k_y} \sin^2 \theta_e + \frac{1}{2k_\theta k_y} \Delta \omega^2$$

Do đó,

$$\dot{V}_{322} \leq -\frac{k_x}{2} x_e^2 - \frac{k_\theta}{2k_y} \sin^2 \theta_e + \frac{\Delta v^2}{2k_x} + \frac{\Delta \omega^2}{2k_\theta k_y} \quad (3.33c)$$

Nếu Δv và $\Delta \omega$ bị chặn thì các hạng cuối của (3.34) cũng bị chặn. Vì vậy, hệ kín tầng động học là UUB, với kích thước miền giới hạn phụ thuộc vào cận của sai số quan sát lỗi. Mặt khác, theo tính chất hội tụ của bộ quan sát lỗi, khi $\Delta v(t) \rightarrow 0$, $\Delta \omega(t) \rightarrow 0$, thì (3.33) tiệm cận về:

$$\dot{V}_{322} = -k_x x_e^2 - \frac{k_\theta}{k_y} \sin^2 \theta_e \leq 0 \quad (3.33d)$$

$\dot{V}_{322} = 0 \Leftrightarrow x_e = 0, \sin \theta_e = 0$. Trong miền $|\theta_e| < \pi$ suy ra $\theta_e = 0$. Trên tập này, phương trình sai số góc trở thành $\dot{\theta}_e = -k_y v_d y_e$. Để tập trên là bất biến phải có $\dot{\theta}_e = 0$. Do $k_y > 0$ và $v_d(t) \geq v_{\min} > 0$, suy ra $y_e = 0$. Như vậy, tập bất biến lớn nhất chứa trong $\{\dot{V}_{322} = 0\}$ chỉ gồm điểm $(x_e, y_e, \theta_e) = (0, 0, 0)$. Theo nguyên lý bất biến LaSalle, điểm cân bằng của hệ kín tầng động học là ổn định tiệm cận trong miền xét. Do đó,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e(t) = 0.$$

Định lý 3.3: Xét hệ kín tầng động lực học có hỗ trợ HiGO gồm mô hình (3.26), bộ quan sát (3.16) và luật điều khiển trượt thích nghi (3.31). Nếu sai số quan sát χ là bị chặn theo kết quả của Mục 3.2.1, thì biến trượt δ và sai số bám vận tốc của vòng trong là UUB. Kích thước tập giới hạn phụ thuộc vào cận sai số quan sát và tham số ε . Nếu sai số quan sát hội tụ về không thì δ và sai số bám vận tốc tương ứng hội tụ tiệm cận về gốc.

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V_{323} = \frac{1}{2} \delta^T \delta + \frac{1}{2\lambda_{sw}} e_\lambda^2 \quad (3.34)$$

Do đó, ta có:

$$\dot{V}_{323} = \delta^T \left(-S^\dagger \ddot{q}_d + Bu + \lambda S e_{z_2} + D \right) - \frac{1}{\lambda_{sw}} e_\lambda \dot{\lambda}_{sw} \quad (3.35)$$

Kết hợp với (3.31), ta thu được:

$$\dot{V}_{323} = -\delta^T \hat{\lambda}_{sw} \tanh(\hat{\delta}) + \delta^T \left(\lambda S (z_2 - \hat{z}_2) + D \right) - \frac{1}{\lambda_{sw}} e_\lambda \dot{\lambda}_{sw} \quad (3.36)$$

Khai triển biểu thức này:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{323} &\leq -|\hat{\delta}| \hat{\lambda}_{sw} - |\hat{\delta}| \left(\lambda S (z_2 - \hat{z}_2) + D \right) - e_\lambda |\hat{\delta}| \left(1 + \frac{2}{e_\lambda \pi} \left| \text{atan2}(\xi, \hat{\delta}) \right| \right) \\ &= -|\hat{\delta}| \hat{\lambda}_{sw} - |\hat{\delta}| \left(\lambda S |z_2 - \hat{z}_2| + |D| \right) - \left(\lambda_{sw} - \hat{\lambda}_{sw} \right) |\hat{\delta}| - |\hat{\delta}| \frac{2}{\pi} \left| \text{atan2}(\xi, \hat{\delta}) \right| \\ &= -|\hat{\delta}| \lambda_{sw} - |\hat{\delta}| \left(\lambda S |z_2 - \hat{z}_2| + \gamma_d \right) - \frac{2|\hat{\delta}|}{\pi} \left| \text{atan2}(\xi, \hat{\delta}) \right| \end{aligned} \quad (3.37)$$

Do bộ quan sát mở rộng (3.16) đảm bảo rằng $|z_2 - \hat{z}_2|$ vừa bị chặn vừa đủ nhỏ, suy ra rằng $|\hat{\delta}|(\lambda S|z_2 - \hat{z}_2| + \gamma_d)$ cũng đủ nhỏ. Vì vậy, thành phần chi phối âm $-|\hat{\delta}|\lambda_{sw}$ đảm bảo $\dot{V}_{323} \leq 0$. Do đó, hệ kín tầng động lực học là ổn định theo nghĩa UUB đối với biến trượt δ ; khi sai số quan sát triệt tiêu tiệm cận, $\delta \rightarrow 0$.

Để phân tích tính ổn định ghép của toàn bộ cấu trúc DOA–SMC, định lý 3.4 được thiết lập.

Bổ đề 3.2: Xét hệ động học sai số quan sát HiGO được xác định bởi (3.17) - (3.18). Khi đó, theo kết quả (3.23) - (3.24), sai số quan sát χ là bị chặn cuối cùng đồng đều (UUB) và thỏa mãn

$$\limsup_{x \rightarrow \infty} \|\chi(t)\| \leq \bar{\chi} = \frac{2\|P\|\bar{\gamma}}{\lambda_{\min}(Q)} \quad (3.38)$$

Từ định nghĩa (3.17): $z_2 - \hat{z}_2 = \varepsilon\chi_2$, ta có

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|z_2 - \hat{z}_2\| \leq \varepsilon\bar{\chi} \quad (3.39)$$

Vì vậy, bằng cách lựa chọn ε phù hợp, sai số ước lượng vận tốc có thể được giới hạn trong một lân cận nhỏ của gốc. Đồng thời, theo Định lý 2.1, sai số của bộ quan sát lỗi (2.37) cũng là UUB. Kết quả này cho thấy HiGO và bộ quan sát lỗi phối hợp với nhau đảm bảo sai số ước lượng bị chặn trong điều kiện nhiễu hữu hạn.

Định lý 3.4: Xét NWMR được mô tả bởi (3.15), trong đó nhiễu gộp $D(t)$ bị chặn bởi $\|D(t)\| \leq \gamma_d$. Giả sử bộ quan sát lỗi và HiGO được thiết kế theo (2.37) và (3.16), đồng thời luật điều khiển trượt thích nghi (3.31) với hệ số thích nghi $\hat{\lambda}_{sw}$ được duy trì bị chặn $(0 < \underline{\lambda}_{sw} < \hat{\lambda}_{sw}(t) < \bar{\lambda}_{sw})$. Khi các tham số điều khiển được lựa chọn phù hợp, biến trượt δ , sai số quan sát HiGO χ , trong khi sai số thích nghi e_λ bị chặn $(|e_\lambda(t)| \leq \bar{e}_\lambda, \bar{e}_\lambda > 0)$. Kết hợp với tính bị chặn của sai số bộ quan sát lỗi theo Định lý 2.1 và tính ổn định của tầng động học theo Định lý 3.2, các tín hiệu của kiến trúc điều khiển kín vẫn bị chặn.

Chứng minh:

Xét hàm Lyapunov tổng hợp được định nghĩa như sau:

$$V_{325} = \frac{1}{2}\delta^T\delta + \frac{1}{2}\chi^TP\chi + \frac{1}{2\lambda_{sw}}e_\lambda^2 \quad (3.40)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian của V_{325} . Kết hợp (3.15), (2.37), (3.16) và (3.31), ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{325} = & -\delta^T \hat{\lambda}_{sw} \tanh(\hat{s}) + \delta^T [\lambda S(z_2 - \hat{z}_2) + D(t)] \\ & - \frac{1}{\lambda_{sw}} e_\lambda \dot{\lambda}_{sw} - \frac{1}{2\varepsilon} \chi^T Q \chi + \frac{1}{\varepsilon} \chi^T P \Upsilon(t) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Từ Bổ đề 3.2, các hạng chéo liên quan đến χ và $D(t)$ bị chặn. Mặt khác, trên miền hoạt động hữu hạn của robot, tồn tại $\bar{S} > 0$ sao cho $\|S(q)\| \leq \bar{S}$, ta suy ra được:

$$\delta^T [\lambda S(z_2 - \hat{z}_2) + D(t)] \leq \frac{1}{2} \eta_1 \|\delta\|^2 + \frac{1}{2} \eta_2 \|\chi\|^2 + \frac{1}{2} \gamma_d^2 \quad (3.42)$$

$$\text{trong đó } \eta_1 > 1, \eta_2 \geq \frac{\lambda^2 \bar{S}^2 \varepsilon^2}{\eta_1 - 1}.$$

Từ luật cập nhật thích nghi (3.31), trên miền hoạt động hữu hạn tồn tại một hằng số chặn $\eta_3 > 0$ sao cho:

$$-\frac{1}{\lambda_{sw}} e_\lambda \dot{\lambda}_{sw} \leq \eta_3 e_\lambda^2 \quad (3.43)$$

Thay (3.23), (3.42), (3.43) vào (3.41), ta được:

$$\dot{V}_{325} \leq -\left(\hat{\lambda}_{sw} - \frac{\eta_1}{2}\right) \|\delta\|^2 - \left(\frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\varepsilon} - \frac{\eta_2}{2}\right) \|\chi\|^2 + \eta_3 e_\lambda^2 + \frac{\gamma_d^2}{2} + \frac{\|P\| \bar{\Upsilon}}{\varepsilon} \quad (3.44)$$

Áp dụng bất đẳng thức Young với $\eta_4 > 0$, ta có

$$\frac{\|P\| \bar{\Upsilon}}{\varepsilon} \|\chi\| \leq \frac{\eta_4}{2} \|\chi\|^2 + \frac{\|P\|^2 \bar{\Upsilon}^2}{2\eta_4 \varepsilon^2} \quad (3.45)$$

Do đó:

$$\dot{V}_{325} \leq -\alpha_{13} \|\delta\|^2 - \alpha_{23} \|\chi\|^2 + C_3 \quad (3.46a)$$

$$\text{trong đó } \alpha_{13} = \hat{\lambda}_{sw} - \frac{\eta_1}{2}, \alpha_{23} = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\varepsilon} - \frac{\eta_2 + \eta_4}{2}, C_3 = \eta_3 \bar{e}_\lambda^2 + \frac{\gamma_d^2}{2} + \frac{\|P\|^2 \bar{\Upsilon}^2}{2\eta_4 \varepsilon^2}.$$

Lựa chọn các tham số điều khiển và bộ quan sát sao cho $\hat{\lambda}_{sw} > \frac{\eta_1}{2}$, $\frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\varepsilon} > \frac{\eta_2 + \eta_4}{2}$ ta được $\alpha_{13}, \alpha_{23} > 0$. Đặt $\alpha_3 = \min\{\alpha_{13}, \alpha_{23}\}$ ta có:

$$\dot{V}_{325} \leq -\alpha_3 (\|\delta\|^2 + \|\chi\|^2) + C_3 \quad (3.46b)$$

$$\text{Do đó } \dot{V}_{325}(t) < 0 \text{ bên ngoài tập } \|\delta\|^2 + \|\chi\|^2 > \frac{C_3}{\alpha_3}$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, biến trượt δ và sai số quan sát HiGO χ là UUB và thỏa mãn:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\delta, \chi\| \leq \sqrt{\frac{C_3}{\min(\alpha_{13}, \alpha_{23})}} \quad (3.47)$$

Do $e_\lambda(t)$ bị chặn, kết hợp với tính bị chặn của sai số bộ quan sát lỗi theo Định lý 2.1 và tính ổn định của tăng động học theo Định lý 3.2, các tín hiệu của kiến trúc điều khiển kín đều bị chặn. Như vậy, dưới các giả thiết và điều kiện lựa chọn tham số nêu trên, biến trượt, sai số quan sát và các tín hiệu của hệ kín được duy trì bị chặn, trong đó δ và χ là bị chặn cuối cùng đồng đều.

3.2.4. Kết quả mô phỏng, nhận xét và thảo luận

a. Thiết lập mô phỏng

Bảng 2.1 thể hiện các tham số của NWMR được sử dụng trong các mô phỏng.

Quỹ đạo đặt được cho bởi: $q_d = [5 \cos(0.3t) \quad 5 \sin(0.3t) \quad 0.3t + 0.5\pi]^T$, với trạng thái ban đầu của robot được thiết lập ở gốc tọa độ: $x(0) = 0; y(0) = 0; \theta(0) = 0$.

Các tham số được liệt kê trong Bảng 3.2 được xác định sao cho thỏa mãn các tiêu chuẩn ổn định Lyapunov được suy ra trong Mục 3.2.3. Hệ số chuyển mạch được chọn sao cho $\lambda_{sw} > \gamma_d$, nhằm đảm bảo tính bền vững trước các nhiễu bị chặn. Các hệ số của bộ quan sát được lựa chọn để đảm bảo hội tụ nhanh của bộ quan sát khuếch đại cao và bộ quan sát lỗi, đồng thời không khuếch đại nhiễu đo.

Bảng 3.2. Giá trị tham số của bộ điều khiển và bộ quan sát

Bộ điều khiển	Các tham số điều khiển
B-SMC	$k_x = 1.7, k_y = 10, k_\theta = 8, k_p = 10, k_I = 0.01$ $k_{sw1} = k_{sw2} = 50, k_v = k_\omega = 100$
HiGO-SMC	$k_x = 1.7, k_y = 10, k_\theta = 8$ $\lambda = 200, \gamma_1 = 2, \gamma_2 = 3, \varepsilon = 0.01, \xi = 0.01$
DOA-SMC	$k_x = 1.7, k_y = 10, k_\theta = 5$ $\lambda = 200, \gamma_1 = 2, \gamma_2 = 3, \varepsilon = 0.01, \xi = 0.01$ $Le = [100 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 100]$

b. Kết quả, đánh giá

Trong điều kiện lý tưởng, không có nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành, cả ba bộ điều khiển đều đạt được khả năng bám quỹ đạo thỏa đáng với sai số không đáng kể. Do đó, để đảm bảo tính súc tích, chỉ các trường hợp có lỗi và bất định được trình bày trong phần này.

Để đánh giá toàn diện khả năng chịu lỗi của bộ điều khiển đề xuất, một chuỗi các lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu ngoài được áp dụng trong khoảng thời gian mô phỏng 45 giây. Kịch bản lỗi cơ cấu chấp hành được xây dựng như sau:

- Lỗi LoE hằng (Constant Loss of Effectiveness): Từ 10s đến 15s, đầu ra của cơ cấu chấp hành bị suy giảm hiệu suất cố định 45%, được mô hình hóa như: $u_f(t) = (1 - 0.45)u(t)$ với $\Delta v(t) = 0.45v, \Delta \omega(t) = 0.45\omega$.

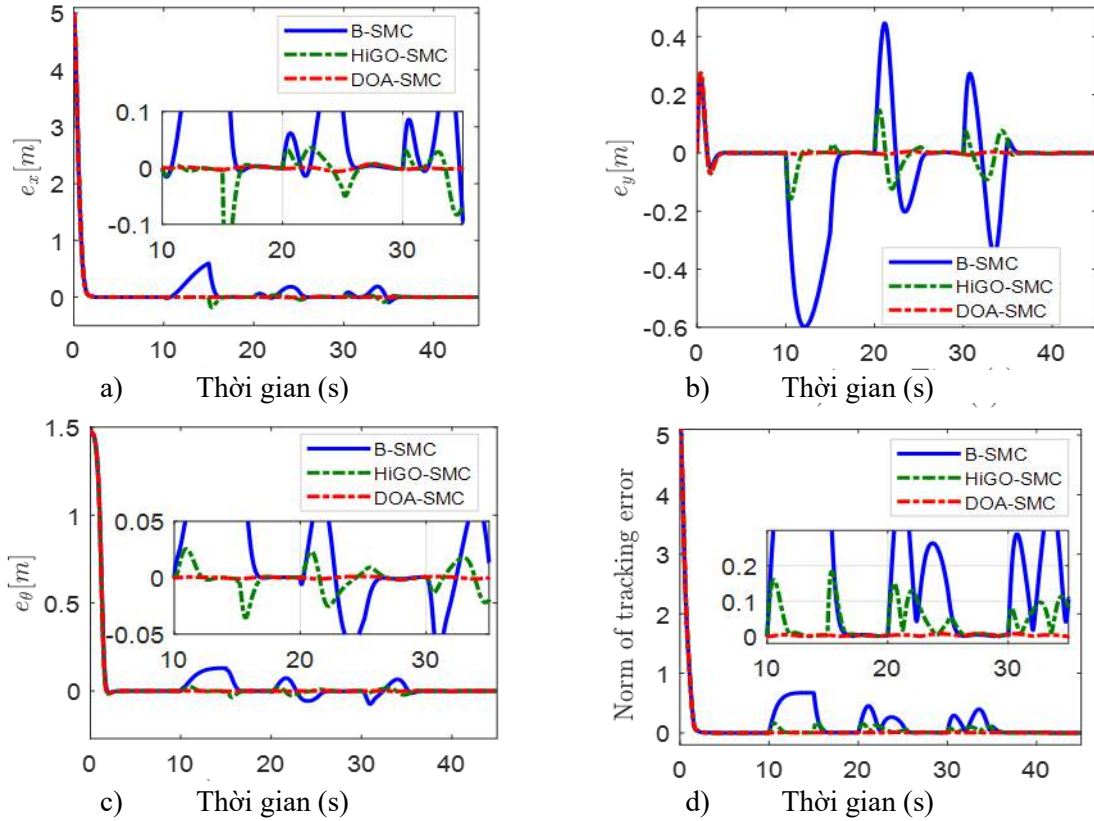
- Lỗi LoE biến thiên theo thời gian (Time-varying LoE): Từ 20s đến 25s, cơ cấu chấp hành chịu suy giảm dạng hình sin: $u_f(t) = (1 - 0.45 \sin(t))u(t)$ biểu diễn

hiệu suất dao động của cơ cấu chấp hành do các ảnh hưởng nhiệt hoặc cơ khí, với: $\Delta v(t) = 0.45v \sin(t)$, $\Delta \omega(t) = 0.45\omega \cos(t + \pi/2)$

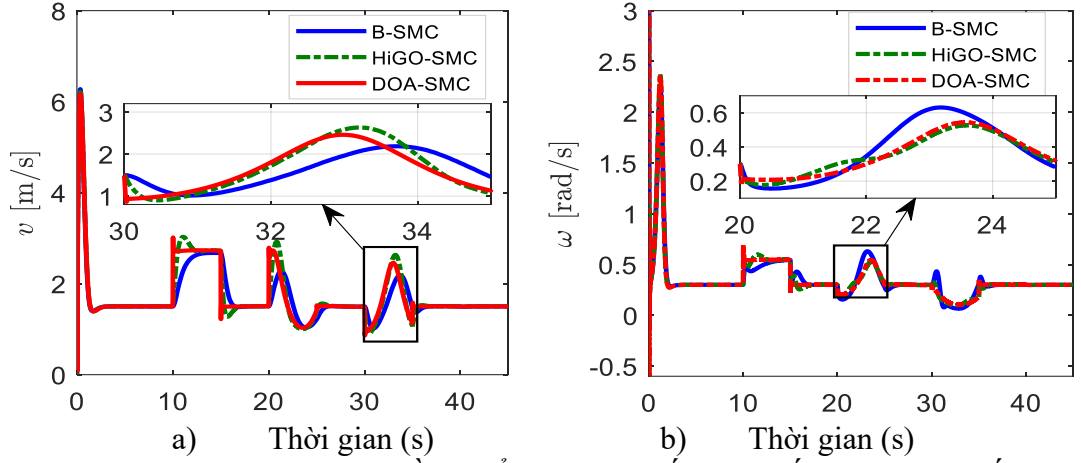
- Lỗi lệch cộng (Additive bias fault): Từ 30s đến 35s, một lỗi lệch được đưa vào, mô hình hóa như: $u_f(t) = (1 - 0.45)u(t) + 0.15$ tương ứng với hiện tượng sai hiệu chuẩn hoặc trôi tín hiệu trong đáp ứng của cơ cấu chấp hành: $\Delta v(t) = 0.45v - 0.15$, $\Delta \omega(t) = 0.45\omega - 0.15$.

Ngoài ra, một nhiễu ngoài dạng hình sin được áp dụng lên hệ thống từ 10s đến 35s, chồng lấn với các khoảng lỗi. Thiết lập này nhằm kiểm tra nghiêm ngặt tính bền vững và khả năng chịu lỗi của sơ đồ điều khiển trượt có hỗ trợ quan sát kép.

Nhiều hình sin $Dis = [3\sin(t) \quad 2\cos(t)]^T$ được áp dụng để kiểm chứng tính bền vững. Sai số tham số mô hình $m = 69.263 + 7\eta_R$, $I = 4.729 + 0.5\eta_R$ với $0 < \eta_R < 1$ là giá trị ngẫu nhiên phân bố đều.

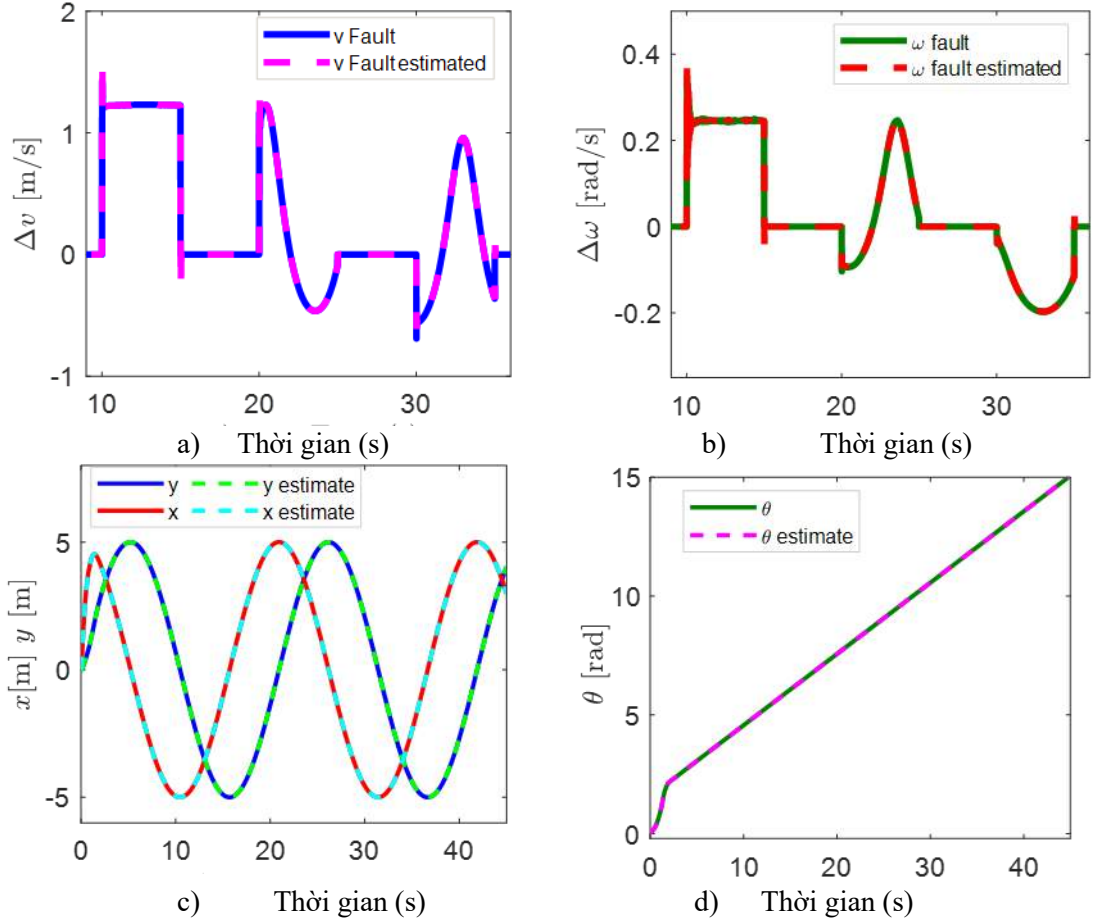


Hình 3.11. Sai số bám trạng thái: (a) x_e ; (b) y_e ; (c) θ_e ; và (d) $\|e_q\|$. DOA-SMC luôn đạt độ lệch nhỏ nhất và khả năng phục hồi nhanh nhất so với HiGO-SMC và B-SMC, qua đó khẳng định độ chính xác bám và tính bền vững vượt trội.

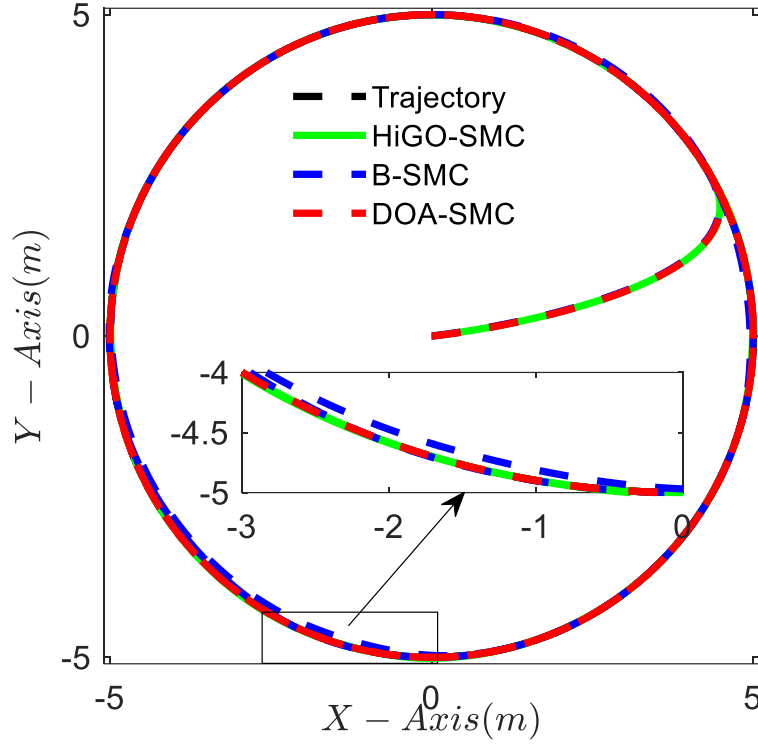


Hình 3.12. Tín hiệu điều khiển: (a) vận tốc tịnh tiến và (b) vận tốc góc.

DOA-SMC tạo ra các hiệu chỉnh vận tốc góc mạnh hơn sau khi xảy ra lỗi nhưng vẫn tránh được bão hòa cơ cấu chấp hành, đồng thời thành phần chuyển mạch liên tục giúp giảm hiện tượng rung so với SMC truyền thống.



Hình 3.13. Ước lượng của các bộ quan sát: (a) lỗi vận tốc tịnh tiến thông qua FO; (b) lỗi vận tốc góc thông qua FO; (c) vị trí theo trục X và Y thông qua HiGO; (d) góc hướng từ HiGO.



Hình 3.14. Kết quả bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi.

Để đánh giá định lượng chất lượng bám quỹ đạo của các phương pháp điều khiển, luận án sử dụng các chỉ số sai số:

- Sai số bình phương trung bình (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2$$

- Căn bậc hai của sai số bình phương trung bình (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2}$$

- Sai số tuyệt đối trung bình (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e_k|$$

- Tích phân sai số tuyệt đối (IAE):

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

- Tích phân bình phương sai số (ISE):

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt$$

Trong đó $e(t)$ là sai số theo thời gian, e_k là sai số tại mẫu thứ k , N là tổng số mẫu, T là thời gian quan sát.

Bảng 3.3. Chỉ số hiệu năng bám đối với sai số hướng

CHỈ SỐ	DOA-SMC	B-SMC	HiGO-SMC
MSE	0.0474	0.0491	0.0474
MAE	0.0383	0.0608	0.0423
RMSE	0.2176	0.2216	0.2177
IAE	1.7231	2.7377	1.9041
ISE	2.1316	2.2100	2.1323

Bảng 3.4. Chỉ số hiệu năng bám đối với sai số Euclid tổng (x, y)

CHỈ SỐ	DOA-SMC	B-SMC	HiGO-SMC
MSE	0.2134	0.2648	0.2161
MAE	0.0663	0.1831	0.0879
RMSE	0.4620	0.5146	0.4649
IAE	2.9851	8.2424	3.9553
ISE	9.6068	11.9197	9.7270

Hình 3.11–3.14 minh họa hiệu năng so sánh của ba bộ điều khiển dưới các điều kiện lỗi cơ cấu chấp hành khác nhau. Hình 3.11 thể hiện sai số bám theo các trục x , y và góc hướng θ . Kết quả cho thấy DOA–SMC duy trì sai số nhỏ hơn so với hai phương pháp đối chứng trong phần lớn thời gian mô phỏng. Đối với sai số hướng, các chỉ số định lượng trong Bảng 3.3 cho thấy DOA–SMC đạt RMSE = 0.2176 và IAE = 1.7231, thấp hơn B–SMC với RMSE = 0.2216 và IAE = 2.7377. HiGO–SMC cho kết quả trung gian, trong khi DOA–SMC thể hiện khả năng phục hồi tốt hơn sau các giai đoạn xuất hiện lỗi nhờ sự phối hợp giữa HiGO và bộ quan sát lỗi.

Hình 3.12 trình bày các tín hiệu điều khiển tương ứng. DOA–SMC tạo ra các điều chỉnh phù hợp sau khi lỗi xuất hiện và duy trì tín hiệu điều khiển ổn định trong suốt quá trình mô phỏng. Đối với kênh hướng, Bảng 3.3 cho thấy chỉ số ISE của DOA–SMC là 2.1316, nhỏ hơn giá trị 2.2100 của B–SMC. Kết quả này cho thấy phương pháp đề xuất duy trì được mức năng lượng sai số tích lũy thấp hơn. Đồng thời, việc sử dụng hàm chuyển mạch liên tục giúp hạn chế dao động tần số cao so với cấu trúc SMC sử dụng hàm dấu lý tưởng.

Hình 3.13 mô tả kết quả ước lượng của các bộ quan sát. HiGO tái tạo các vận tốc không đo được, trong khi bộ IFO cung cấp ước lượng lỗi cơ cấu chấp hành để phục vụ cơ chế bù trong vòng điều khiển. Các dao động nhỏ còn xuất hiện trong quá trình ước lượng nhưng không làm mất tính bị chặn của các tín hiệu quan sát. Kết quả

này cho thấy cấu trúc kết hợp HiGO–FO có khả năng cung cấp thông tin trạng thái và lỗi cần thiết cho bộ điều khiển DOA–SMC.

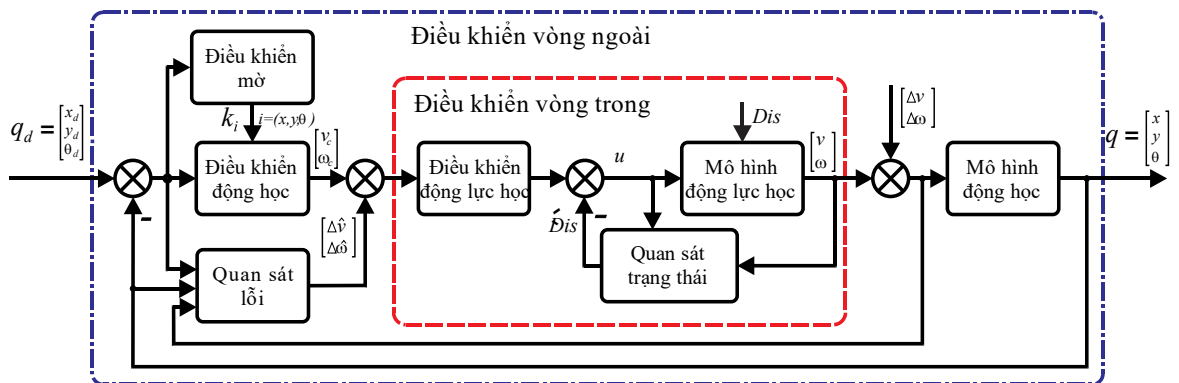
Hình 3.14 thể hiện quỹ đạo tham chiếu và quỹ đạo thực tế trong mặt phẳng x – y . Có thể quan sát rằng cả ba bộ điều khiển đều duy trì khả năng bám quỹ đạo, tuy nhiên DOA–SMC cho quỹ đạo gần quỹ đạo tham chiếu hơn trong các giai đoạn chịu ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành. Do mức sai lệch giữa các quỹ đạo trên hình tương đối nhỏ, việc đánh giá chính xác hơn cần dựa trên các chỉ số định lượng thay vì chỉ quan sát trực tiếp từ đồ thị.

So sánh định lượng trong Bảng 3.3 và Bảng 3.4 tiếp tục làm rõ các kết quả trên. Đối với sai số hướng, Bảng 3.3 cho thấy DOA–SMC đạt $RMSE = 0.2176$ và $IAE = 1.7231$. Đối với sai số vị trí Euclid, Bảng 3.4 cho thấy DOA–SMC đạt $RMSE = 0.4620$, thấp hơn khoảng 10.1% so với B–SMC với $RMSE = 0.5146$. Đồng thời, IAE giảm từ 8.2424 xuống 2.9851, tương ứng khoảng 63.8%, và ISE giảm từ 11.9197 xuống 9.6068, tương ứng khoảng 19.4%. Các kết quả này cho thấy cấu trúc quan sát kép giúp cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo và giảm sai số tích lũy trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

Các kết quả mô phỏng cập nhật cho thấy DOA–SMC cung cấp một giải pháp chịu lỗi mang tính thực tiễn và hiệu quả về mặt tính toán. Những cải thiện hiệu năng đạt được (xấp xỉ 10% giảm $RMSE$ và trên 60% giảm sai số tích lũy) phản ánh các lợi ích thực tế, có thể chuyển hóa thành khả năng bám quỹ đạo mượt mà và an toàn hơn trong các nền tảng robot di động ngoài thực tế, vốn chịu ảnh hưởng của suy giảm cơ cấu chấp hành, nhiễu loạn và các bất định khác.

Đánh giá: Cấu trúc điều khiển chịu lỗi dựa trên hai bộ quan sát được trình bày trong Mục 3.2 đã cho phép ước lượng đồng thời nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành, qua đó nâng cao đáng kể khả năng bù lỗi chủ động và độ bền vững của hệ thống trong điều kiện tồn tại nhiễu loạn và các bất định.

3.3. Điều khiển chịu lỗi phân tầng cho NWMR dựa trên FB-IFO và SMC-ESO

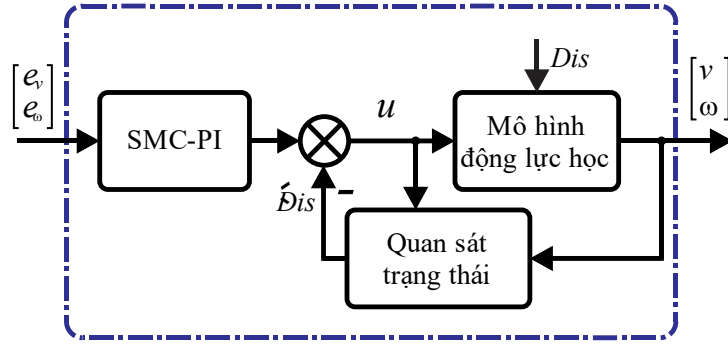


Hình 3.15. Cấu trúc bộ điều khiển FB-IFO-SMC-ESO

FTC là một hướng tiếp cận hiệu quả nhằm phát hiện, ước lượng và bù lỗi chủ động trong luật điều khiển. Tuy nhiên, trong robot di động, lỗi cơ cấu chấp hành thường tương tác với nhiễu và bất định, khiến việc xử lý tách biệt kém hiệu quả. Do đó, mục này đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi tích hợp SMC với bộ quan sát nhiễu và lỗi nhằm đảm bảo tính bền vững, bù lỗi và duy trì khả năng bám quỹ đạo.

3.3.1. Bộ điều khiển tăng động lực học dựa trên SMC-ESO

Cấu trúc của bộ điều khiển vòng trong được đề xuất được minh họa trong Hình 3.16. Bộ điều khiển này được thiết kế để tạo ra các vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc $[v \ \omega]^T$ sao cho chúng bám tiệm cận các giá trị mong muốn $[v_c \ \omega_c]^T$, các giá trị này được xác định bởi vòng ngoài. Thiết kế điều khiển dựa trên sự kết hợp giữa SMC-PI và ESO nhằm tăng cường tính bền vững.



Hình 3.16. Cấu trúc bộ điều khiển vòng trong SMC-PI-ESO.

Nhận xét 3.2: Trong điều khiển trượt, có thể sử dụng nhiều dạng bề mặt khác nhau như bề mặt trượt đầu cuối, bậc cao, mũ hoặc động. Trong nghiên cứu này, bề mặt trượt tỉ lệ–tích phân (PI) được lựa chọn do khả năng cải thiện sai số xác lập đồng thời vẫn đảm bảo tính bền vững trước nhiễu. Mặc dù các dạng bề mặt khác có thể mang lại lợi ích về hội tụ hữu hạn thời gian hoặc cải thiện đáp ứng quá độ, bề mặt PI được xem là một lựa chọn cân bằng giữa tính đơn giản trong triển khai và hiệu quả thực tiễn.

a. SMC-PI

Kế thừa cấu trúc bề mặt trượt PI trong [70] và mở rộng cho hai kênh vận tốc của NWMR, mặt trượt được chọn như sau:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_v + k_v \int e_v dt \\ e_\omega + k_\omega \int e_\omega dt \end{bmatrix}, \quad (k_v, k_\omega > 0) \quad (3.48)$$

trong đó $e_v = v_d - v$; $e_\omega = \omega_d - \omega$, $\mathcal{G}_d = [v_d \ \omega_d]^T$ là véc tơ vận tốc mong muốn.

Lấy đạo hàm của (3.48), ta có:

$$\dot{\delta} = \begin{bmatrix} \dot{v}_d - \dot{v} + k_v e_v \\ \dot{\omega}_d - \dot{\omega} + k_\omega e_\omega \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Khi $\dot{\delta} = 0$:

$$\begin{cases} \dot{v} = k_v e_v + \dot{v}_{ref} \\ \dot{\omega} = k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_{ref} \end{cases} \quad (3.50)$$

Kết hợp (3.50) với (2.26), luật điều khiển tương đương được đề xuất:

$$u_{eq} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1} (k_v e_v + \dot{v}_d - k_2 v - \hat{D}_v) \\ \frac{1}{k_3} (k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_d - k_4 \omega - \hat{D}_\omega) \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

trong đó $\hat{D}_v$, $\hat{D}_\omega$ là các thành phần nhiễu gộp được ước lượng trong (2.50), và sẽ được bù trực tiếp trong luật điều khiển.

Luật điều khiển chuyển mạch được xây dựng như sau:

$$u_{sw} = \begin{bmatrix} k_{sw1} \text{sign}(\delta_1) \\ k_{sw2} \text{sign}(\delta_2) \end{bmatrix}, (k_{sw1}, k_{sw2} > 0) \quad (3.52)$$

Nhận xét 3.3: Để giảm hiện tượng rung (chattering), hàm dấu rời rạc được thay thế bằng hàm tanh($\cdot$), là một xấp xỉ của hàm dấu. Độ chính xác của phép xấp xỉ này phụ thuộc vào tham số độ dốc của hàm tanh.

Do đó, luật điều khiển chuyển mạch có thể được điều chỉnh như sau:

$$u_{sw} = \begin{bmatrix} k_{sw1} \tanh(\delta_1) \\ k_{sw2} \tanh(\delta_2) \end{bmatrix}, (k_{sw1}, k_{sw2} > 0) \quad (3.53)$$

Bộ điều khiển SMC–PI được đề xuất:

$$u_{SMC} = u_{eq} + u_{sw} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1} (k_v e_v + \dot{v}_d - k_2 v - \hat{D}_v) + k_{sw1} \tanh(\delta_1) \\ \frac{1}{k_3} (k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_d - k_4 \omega - \hat{D}_\omega) + k_{sw2} \tanh(\delta_2) \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Định lý 3.5: Xét mô hình động lực học (2.26) dưới Giả thiết 2.1, với bề mặt trượt dạng PI (3.48), luật điều khiển SMC–PI được xây dựng trong (3.54) và bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO trong (2.50), chiến lược được đề xuất đảm bảo mặt trượt ($\delta = 0$) đạt được trong một khoảng thời gian hữu hạn, ngay cả khi tồn tại ảnh hưởng của nhiễu.

Chứng minh:

Chọn hàm ứng viên Lyapunov dương:

$$V_{331} = \frac{1}{2} \delta^T \delta = \frac{1}{2} (\delta_1^2 + \delta_2^2) \quad (3.55)$$

$V_{331} > 0$ với mọi $\delta \neq 0$ và $V_{331} = 0$ khi $\delta = 0$.

Lấy đạo hàm theo thời gian của V_{331} , ta được:

$$\dot{V}_{331} = \delta_1 \dot{\delta}_1 + \delta_2 \dot{\delta}_2 \quad (3.56)$$

Từ mô hình động lực học (2.26), định nghĩa mặt trượt (3.48) và quan hệ sai số tương ứng, suy ra động học của mặt trượt có dạng:

$$\dot{\delta} = \begin{bmatrix} \dot{\delta}_1 \\ \dot{\delta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_d + k_v e_v - k_1 u_1 - k_2 v - D_v \\ \dot{\omega}_d + k_\omega e_\omega - k_3 u_2 - k_4 \omega - D_\omega \end{bmatrix} \quad (3.57a)$$

Thay luật điều khiển SMC-PI trong (3.54) vào (3.57), ta thu được:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\delta}_1 \\ \dot{\delta}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{v}_{ref} + k_v e_v - k_2 v - D_v - \dots \\ -k_1 \left(\frac{1}{k_1} (k_v e_v + \dot{v}_d - k_2 v - \hat{D}_v) + k_{sw1} \tanh(\delta_1) \right) \\ \dot{\omega}_d + k_\omega e_\omega - k_4 \omega - D_\omega - \dots \\ -k_3 \left(\frac{1}{k_3} (k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_d - k_4 \omega - \hat{D}_\omega) + k_{sw2} \tanh(\delta_2) \right) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -k_1 k_{sw1} \tanh(\delta_1) + (\hat{D}_v - D_v) \\ -k_3 k_{sw2} \tanh(\delta_2) + (\hat{D}_\omega - D_\omega) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.57b)$$

Do ESO trong (2.50) bảo đảm khả năng ước lượng nhiều, nên sai số ước lượng $\tilde{D}_i = \hat{D}_i - D_i, i = v, \omega$ là bị chặn và tiến về lân cận không. Khi đó, từ (3.56) và (3.57), ta có:

$$\dot{V}_{331} = -k_1 k_{sw1} \delta_1 \tanh(\delta_1) - k_3 k_{sw2} \delta_2 \tanh(\delta_2) + \delta_1 \tilde{D}_v + \delta_2 \tilde{D}_\omega \quad (3.58)$$

Bộ quan sát trạng thái mở rộng ESO trong (2.50) đảm bảo sai số ước lượng $\tilde{D}_i$ bị chặn và tiến về lân cận không. Do đó, khi chọn các hệ số chuyển mạch k_{sw1}, k_{sw2} đủ lớn, tồn tại các hằng số dương c_{sw1}, c_{sw2} sao cho:

$$\dot{V}_{331} \leq -c_{sw1} |\delta_1| - c_{sw2} |\delta_2| \leq 0 \quad (3.59)$$

Như vậy, $\dot{V}_{331}$ là âm bán xác định, suy ra mặt trượt δ bị chặn và hệ ổn định theo lý thuyết Lyapunov [64].

Trong trường hợp sai số ước lượng của ESO đủ nhỏ, có thể viết:

$$\dot{V}_{331} \leq -\eta_{sw1} |\delta_1| - \eta_{sw2} |\delta_2|, \quad \eta_{sw1}, \eta_{sw2} > 0 \quad (3.60)$$

Bất đẳng thức trên cho thấy quỹ đạo hệ được dẫn về mặt trượt $\delta = 0$ trong thời gian hữu hạn. Vì vậy, chiến lược điều khiển SMC-PI kết hợp bộ quan sát trạng

thái mở rộng ESO đảm bảo mặt trượt được đạt tới trong thời gian hữu hạn, đồng thời bảo đảm tính ổn định của hệ kín.

3.3.2. Bộ điều khiển vòng ngoài trên cơ sở kết hợp thích ứng mờ và quan sát lỗi cải tiến

Cấu trúc của bộ điều khiển vòng ngoài được minh họa trong Hình 3.17. Dựa trên vận tốc mong muốn, vị trí tham chiếu ảo của NWMR được tính toán thông qua phương trình động học.

Mô hình sai số bám của NWMR có thể được biểu diễn như sau:

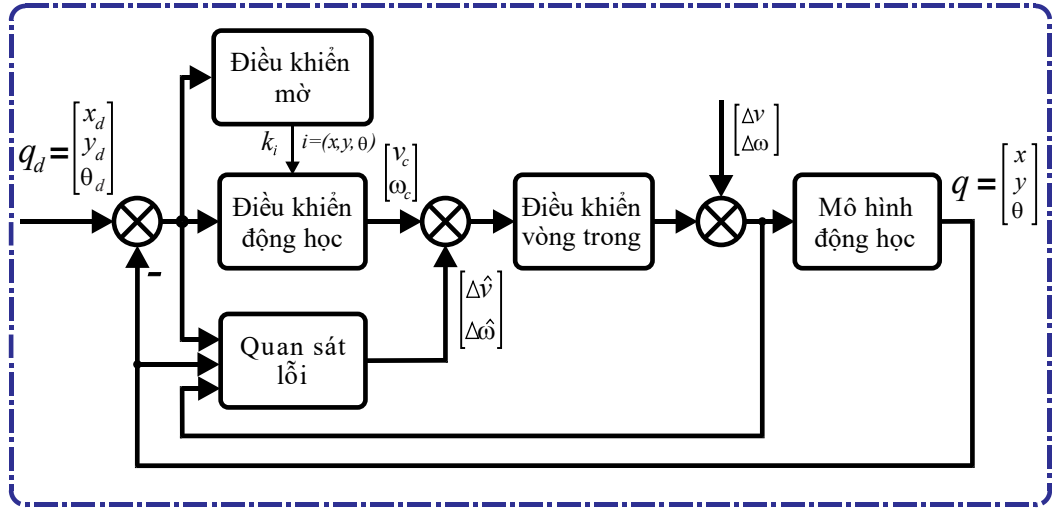
$$e_q = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Lấy đạo hàm của (3.61), ta được:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_d \cos \theta_e \\ -\omega x_e + v_d \sin \theta_e \\ \omega_{ref} - \omega \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Để đảm bảo nhiệm vụ bám mong muốn, tín hiệu điều khiển được chọn:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \cos \theta_e + k_x x_e \\ \omega_d + k_y v_d y_e + k_\theta \sin \theta_e \end{bmatrix}, k_i > 0, (i = x, y, \theta) \quad (3.63)$$



Hình 3.17. Cấu trúc của bộ điều khiển vòng ngoài – FB-IFO

Lỗi cơ cấu chấp hành được xem xét như các đầu vào không biết, làm thay đổi mô-men xoắn do động cơ DC sinh ra, từ đó ảnh hưởng đến chuyển động của robot theo thời gian thực. Các lỗi này được mô hình hóa như các thay đổi không biết trong đầu ra của cơ cấu chấp hành $(\Delta v, \Delta \omega)$.

Khi xét đến ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành, mô hình sai số (3.62) trở thành:

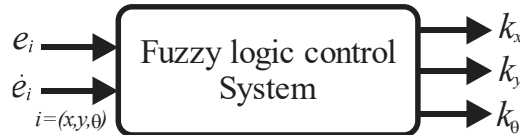
$$\dot{e}_q = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_d \cos \theta_e - \Delta \omega y_e + \Delta v \\ -\omega x_e + v_d \sin \theta_e + \Delta \omega x_e \\ \omega_d - \omega + \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Trong trường hợp này, luật điều khiển được đề xuất là:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \cos \theta_e + k_x x_e + \Delta v \\ \omega_d + k_y v_r y_e + k_\theta \sin \theta_e + \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Trong (3.65) hai nhiệm vụ thiết kế được đặt ra bao gồm: 1) Sử dụng bộ quan sát lỗi cải tiến (2.37) để ước lượng thành phần $F_a = [\Delta v \ \Delta \omega]^T$ ảnh hưởng bởi lỗi cơ cấu chấp hành; 2) tự động cập nhật thích ứng các giá trị dương phù hợp cho k_x, k_y, k_θ thông qua một bộ điều khiển mờ.

Thông thường, các tham số k_x, k_y, k_θ cần được hiệu chỉnh cẩn thận thông qua các quy trình tối ưu phức tạp. Trong nghiên cứu này, một bộ điều khiển logic mờ được đề xuất nhằm tự động điều chỉnh các hệ số này dựa trên sai số vị trí và hướng của robot. Kế thừa nguyên lý điều khiển logic mờ thích nghi cho WMR trong [44], một hệ suy luận mờ kiểu Mamdani được xây dựng để hiệu chỉnh trực tuyến các hệ số điều khiển. Các đầu vào của bộ điều khiển mờ là sai số bám e và $\dot{e}$, trong khi các đầu ra là các hệ số được điều chỉnh k_x, k_y, k_θ . Cấu trúc của bộ điều khiển logic mờ được trình bày trong Hình 3.18.



Hình 3.18. Cấu trúc của bộ điều khiển logic mờ

Các bảng luật mờ được xây dựng dựa trên các nguyên tắc điều khiển sau:

- Khi sai lệch bám lớn thì cần tăng hệ số điều khiển để nâng cao tốc độ hội tụ.
- Khi sai lệch nhỏ hoặc gần bằng không thì cần giảm hệ số điều khiển nhằm tránh quá điều chỉnh và dao động.
- Đạo hàm của sai lệch phản ánh xu hướng biến thiên của sai lệch, do đó được sử dụng để điều chỉnh mức thay đổi của hệ số điều khiển nhằm cải thiện đáp ứng quá độ.

Do đó, các luật mờ được xây dựng trên cơ sở động học sai lệch, kinh nghiệm điều khiển phi tuyến, và được hiệu chỉnh thông qua mô phỏng để đảm bảo tính ổn định và hiệu quả.

Miền giá trị của các biến vào đã được xác định rõ:

- Sai lệch bám e được chọn dựa trên sai lệch cực đại giữa vị trí ban đầu của robot và điểm xa nhất trên quỹ đạo tham chiếu. Trong bài toán này, miền giá trị được chọn: $e \in [-5, 5]$
- Đạo hàm sai lệch de được xác định dựa trên tốc độ biến thiên lớn nhất của quỹ đạo tham chiếu. Với giá trị cực đại xấp xỉ 0.8 và có xét thêm biên an toàn trong quá trình quá độ, miền giá trị được chọn: $\dot{e} \in [-1, 1]$

Trong luật điều khiển này, 9 biến ngôn ngữ được sử dụng cho cả đầu vào và đầu ra, bao gồm: NL (Negative Large – Âm rất lớn), NB (Negative Big – Âm lớn), NM (Negative Medium – Âm trung bình), NS (Negative Small – Âm nhỏ), Z (Zero – Không), PS (Positive Small – Dương nhỏ), PM (Positive Medium – Dương trung bình), PB (Positive Big – Dương lớn), PL (Positive Large – Dương rất lớn).

Các luật mờ dùng để điều chỉnh các tham số k_x, k_y, k_θ lần lượt được thể hiện trên Bảng 3.5, Bảng 3.6 và Bảng 3.7.

Bảng 3.5. Giá trị tham số cho k_x

k_x		e								
		NL	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PL
de	NL	PM	PM	PM	PM	PM	PB	PB	PB	PL
	NB	PM	PM	PM	PM	PM	PB	PB	PB	PL
	NM	PS	PM	PM	PM	PM	PM	PB	PB	PL
	NS	PS	PS	PS	PS	PS	PM	PM	PM	PB
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	PS	PM	PM	PB
	PS	NS	NS	Z	Z	Z	PS	PS	PS	PS
	PM	NM	NM	NS	NS	NS	NS	Z	PS	PS
	PB	NL	NB	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PS
	PL	NL	NB	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PS

Bảng 3.6. Giá trị tham số cho k_y

k_y		e								
		NL	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PL
de	NL	PB	PM	PS	Z	NS	NS	NM	NB	NL
	NB	PB	PM	PM	Z	NS	NS	NM	NB	NL
	NM	PB	PM	PM	Z	NS	NS	NM	NM	NL
	NS	PL	PB	PM	PS	Z	NS	NS	NM	NB
	Z	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	NS	NB
	PS	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	NS	NM
	PM	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	Z	PS
	PB	PL	PB	PB	PS	Z	Z	Z	Z	PS
	PL	PL	PB	PB	PS	Z	Z	Z	Z	PS

Bảng 3.7. Giá trị tham số cho k_θ

k_θ		e								
		NL	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PL
de	NL	PB	PM	PM	Z	NS	NS	NM	NB	NL
	NB	PB	PM	PM	Z	NS	NS	NM	NB	NL
	NM	PL	PB	PM	PS	Z	NS	NS	NM	NB
	NS	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	NS	NM
	Z	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	NS	NM
	PS	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	Z	PS
	PM	PL	PB	PM	PS	Z	Z	NS	Z	PS
	PB	PL	PB	PB	PS	Z	Z	Z	Z	PS
	PL	PL	PB	PB	PS	Z	Z	Z	Z	PS

Định lý 3.6. Xét mô hình động học trong (3.64) dưới tác động của lỗi cơ cấu chấp hành. Khi sử dụng luật điều khiển (3.65) và bộ quan sát lỗi cải tiến (2.37), các sai số bám theo vị trí và góc hướng của robot (e_q) hội tụ tiệm cận về 0 và luôn bị chặn.

Chứng minh:

Chọn hàm ứng viên Lyapunov như sau:

$$V_{332} = \frac{x_e^2 + y_e^2}{2} + \frac{1 - \cos \theta_e}{k_y} \quad (3.66)$$

Đạo hàm theo thời gian (3.66):

$$\dot{V}_{332} = x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{\dot{\theta}_e \sin \theta_e}{k_y} \quad (3.67)$$

Thay $\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e$ từ (3.64), ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{332} &= x_e (\omega y_e - v + v_d \cos \theta_e - \Delta \omega y_e + \Delta v) + y_e (-\omega x_e + v_d \sin \theta_e + \Delta \omega x_e) \\ &\quad + \frac{\sin \theta_e (\omega_d - \omega + \Delta \omega)}{k_y} \\ &= x_e (-v + v_d \cos \theta_e + \Delta v) + \frac{\sin \theta_e}{k_y} (\omega_d - \omega + \Delta \omega + k_y y_e v_d) \end{aligned} \quad (3.68)$$

Với luật điều khiển đề xuất trong (3.65), và đóng góp của bộ quan sát lỗi trong (2.37), (3.68) trở thành:

$$\dot{V}_{332} = -k_x x_e^2 - \frac{k_\theta (\sin \theta_e)^2}{k_y} \leq 0 \quad (3.69)$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov [64], e_q hội tụ tiệm cận về 0, đảm bảo nhiệm vụ bám quỹ đạo mong muốn của NWMR.

Nhận xét 3.4. Hệ thống điều khiển được đề xuất bao gồm một số tham số quan trọng trong cả vòng trong và vòng ngoài, có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng tổng thể. Để đảm bảo khả năng triển khai hiệu quả và tránh mất ổn định hoặc yêu cầu điều khiển quá lớn, cần thực hiện hiệu chỉnh tham số một cách cẩn thận. Dưới đây là các hướng dẫn lựa chọn và điều chỉnh các tham số chính của bộ điều khiển:

1) Đối với bộ điều khiển vòng trong dựa trên SMC–PI, các hệ số bề mặt trượt k_v và k_ω (3.48) cần được chọn sao cho đảm bảo hội tụ nhanh của sai số vận tốc. Việc tăng các hệ số này cải thiện độ chính xác bám nhưng có thể gây ra rung tần số cao (chattering) và bão hòa cơ cấu chấp hành. Tham số làm trơn k_{sw1}, k_{sw2} trong hàm chuyển mạch (3.53) cần được điều chỉnh cẩn thận - các giá trị nhỏ hơn tạo ra chuyển mạch sắc nét hơn và độ chính xác cao hơn, nhưng cũng có thể làm tăng công suất điều khiển và mài mòn cơ khí.

2) Đối với ESO (2.50), các hệ số quan sát ρ_1, ρ_2, ρ_3 được tính toán dựa trên băng thông bộ quan sát mong muốn Λ (2.56). Giá trị Λ lớn hơn giúp cải thiện độ chính xác ước lượng nhiễu gộp nhưng làm tăng độ nhạy với nhiễu đo. Các trị riêng của ma trận động học bộ quan sát phải được đặt đủ sâu trong nửa trái mặt phẳng phức để đảm bảo hội tụ nhanh.

3) Đối với bộ quan sát lỗi cải tiến IFO (2.37), hệ số L_0 cần được lựa chọn sao cho động học sai số ước lượng nhanh hơn động học của hệ, nhưng không quá gắt. Nếu sử dụng hệ số phi tuyến (ví dụ: bão hòa hoặc tanh), cần điều chỉnh độ dốc để cân bằng giữa hội tụ nhanh và ổn định số.

4) Đối với bộ điều khiển động học vòng ngoài (3.65), các hệ số k_x, k_y, k_θ được điều chỉnh theo thời gian thực bằng logic mờ dựa trên sai số bám vị trí và hướng. Các hệ số này phải được giới hạn trong các miền hợp lý để tránh quá điều chỉnh và dao động trong các thao tác gấp như quay gắt trong quỹ đạo hình số 8. Các hệ số lớn hơn cho hội tụ nhanh hơn nhưng có thể dẫn đến mất ổn định hoặc hoạt động điều khiển mạnh nếu không bị ràng buộc đúng cách bởi tập luật mờ.

3.3.3. Kết quả mô phỏng, nhận xét và đánh giá

a) Thiết lập mô phỏng

Giá trị các tham số của NWMR và động cơ DC servo được mô tả trong bảng 2.1 và 2.2. Quỹ đạo đặt được mô tả bởi (3.70) và (3.71):

- Quỹ đạo tròn:

$$\begin{cases} x_d = 3 \cos(0.2t) \\ y_d = 3 \sin(0.2t) \\ \theta_d = 0.2t + 0.5\pi \end{cases} \quad (3.70)$$

- Quỹ đạo hình số 8:

$$\begin{cases} x_d = 3 \cos(0.2t) \\ y_d = 2 \sin(0.4t) \\ \theta_d = 0.2t + 0.5\pi \end{cases} \quad (3.71)$$

Bảng 3.8. Giá trị tham số của SMC, FSMC, FB-IFO-SMC-ESO và bộ quan sát

Bộ điều khiển	Giá trị tham số
SMC-PI	$k_x = 0.85, k_y = 20, k_\theta = 5, k_P = 10, k_I = 2$ $k_v = k_\omega = 1000, k_{sw1} = k_{sw2} = 0.01$
FSMC-PI	$k_v = k_\omega = 1000, k_{sw1} = k_{sw2} = 0.01, k_P = 10, k_I = 2$
FB-IFO-SMC-ESO	$k_v = k_\omega = 1000, k_{sw1} = k_{sw2} = 0.01, k_P = 10, k_I = 2,$ $\Lambda = 250, \gamma = 0.5, \alpha = 0.01$ $L_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}; \tau_L = 0.2, T_{init} = 0.5$

b. Kết quả mô phỏng

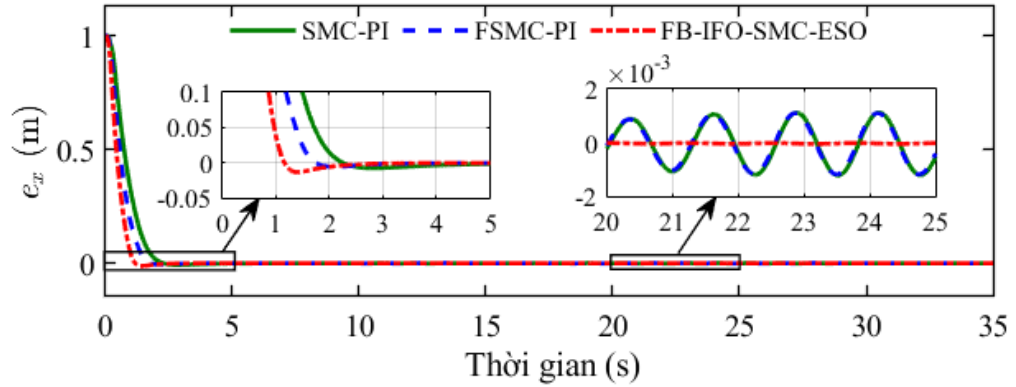
Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, 2 kịch bản được thực hiện:

Trường hợp 1: Robot hoạt động dưới ảnh hưởng của nhiễu loạn nhưng không có lỗi cơ cấu chấp hành

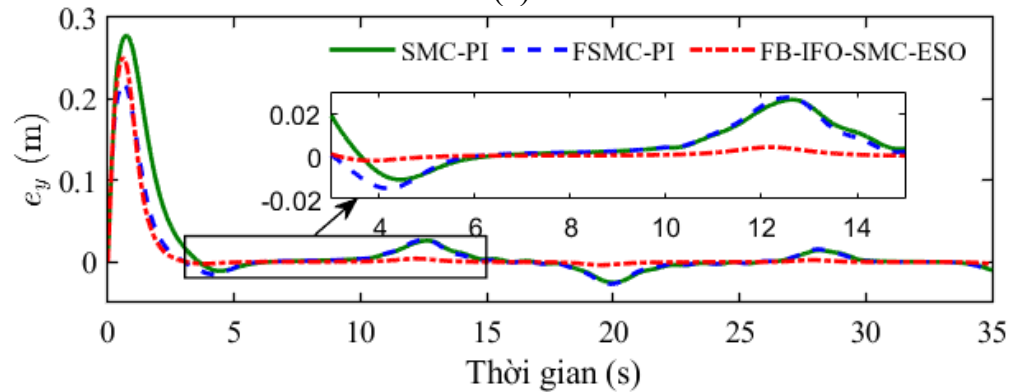
Trong trường hợp này, hiệu suất của bộ điều khiển được đề xuất được đánh giá thông qua so sánh với FSMC và SMC không có ESO khi có nhiễu cực và không có lỗi của cơ cấu chấp hành. Tổng nhiễu được mô tả bởi:

$$\begin{bmatrix} D_v \\ D_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6\sin(5t + \pi/2) \\ 5\cos(4t + \pi) \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

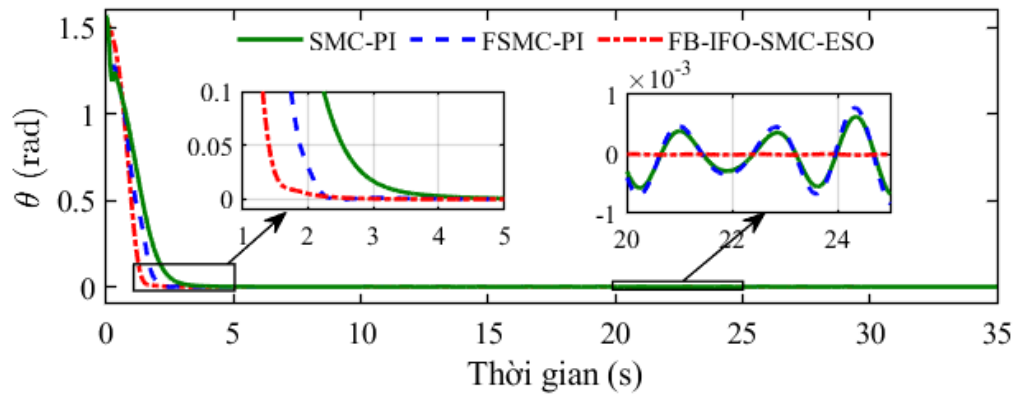
➤ Quỹ đạo hình tròn.



(a)

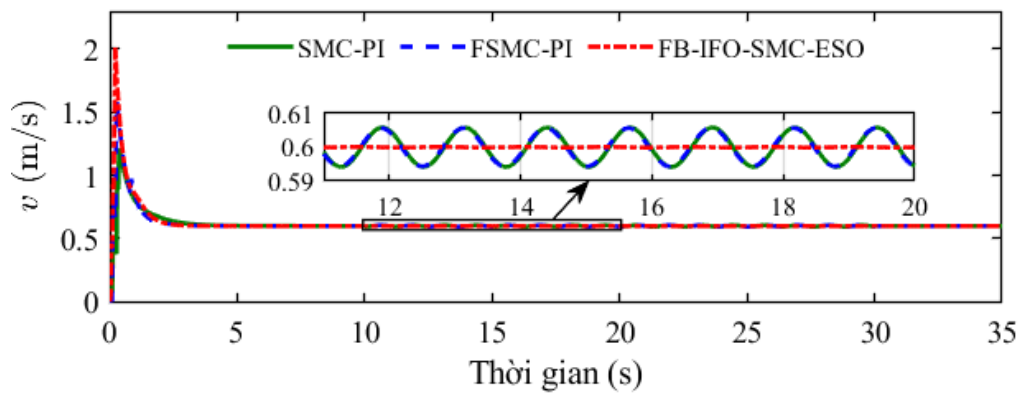


(b)

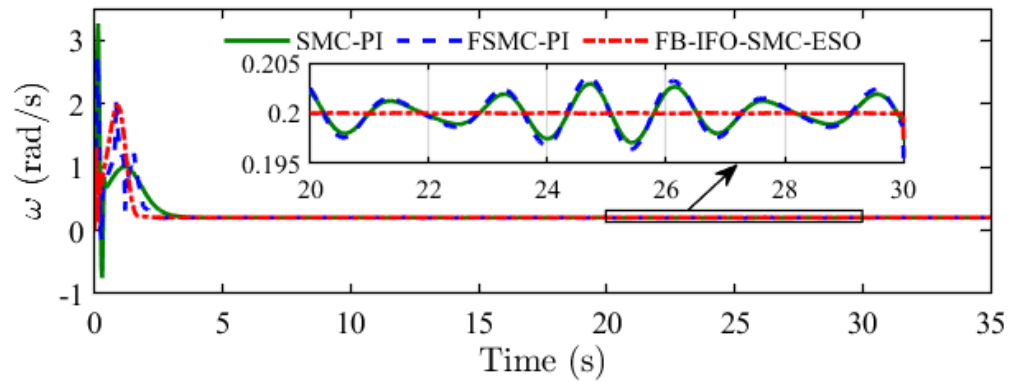


(c)

Hình 3.19. Sai lệch bám theo vị trí của robot (a) Trục X; (b) Trục Y; (c) Góc θ

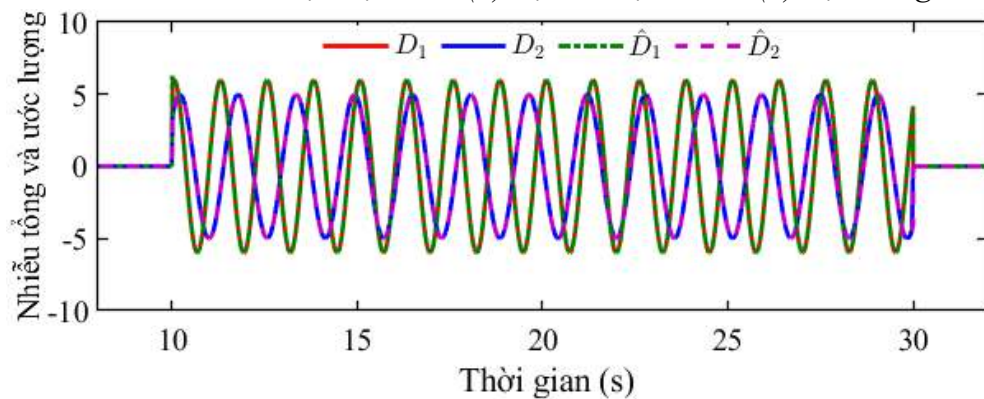


(a)



(b)

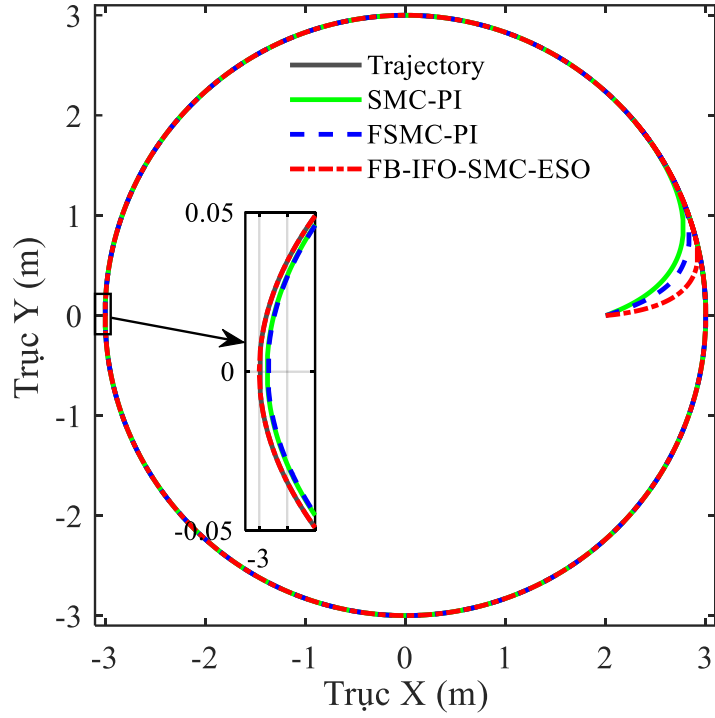
Hình 3.20. Tín hiệu vận tốc: (a) vận tốc tịnh tiến, (b) vận tốc góc



Hình 3.21. Ước lượng tổng nhiễu trên ESO

Kết quả mô phỏng cho quỹ đạo tròn trong điều kiện chỉ nhiễu loạn được thể hiện

trong Hình 3.19–3.22. Hình 3.21 mô tả nhiễu loạn được giới thiệu cùng với ước lượng của nó bằng cách sử dụng ESO. Trong trường hợp này, bộ điều khiển thể hiện khả năng chống lại ảnh hưởng của nhiễu thông qua các giá trị sai lệch theo trục x, trục y và góc hướng của robot thể hiện trong Hình 3.19 (a), (b) và (c). Điều chỉnh vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc thích hợp trong Hình 3.20 (a) và 3.20 (b) tương ứng với các hình dạng quỹ đạo.



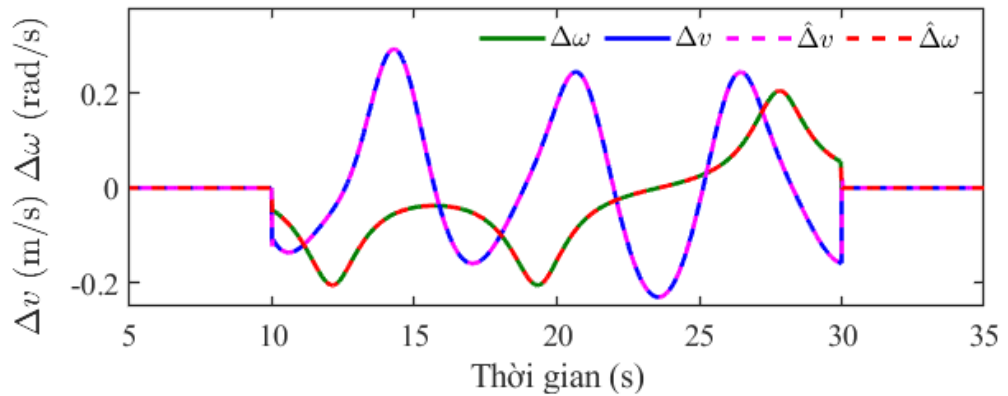
Hình 3.22. Quỹ đạo của robot tương ứng với các bộ điều khiển

Trường hợp 2. Robot hoạt động dưới tác động của nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành.

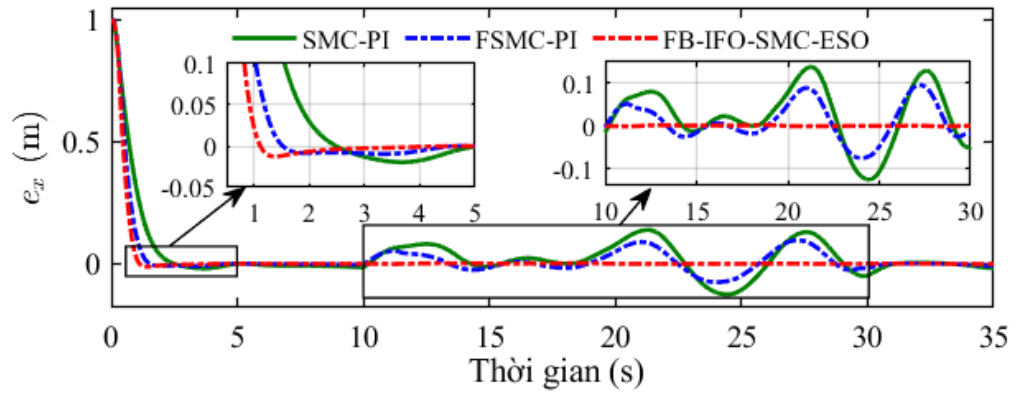
Nhiễu gộp và lỗi cơ cấu chấp hành được đưa vào biểu thị dưới dạng:

$$\begin{bmatrix} D_v \\ D_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6\sin(5t + \pi/2) \\ 5\cos(4t + \pi) \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3v\sin(t) \\ 0.2\omega \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

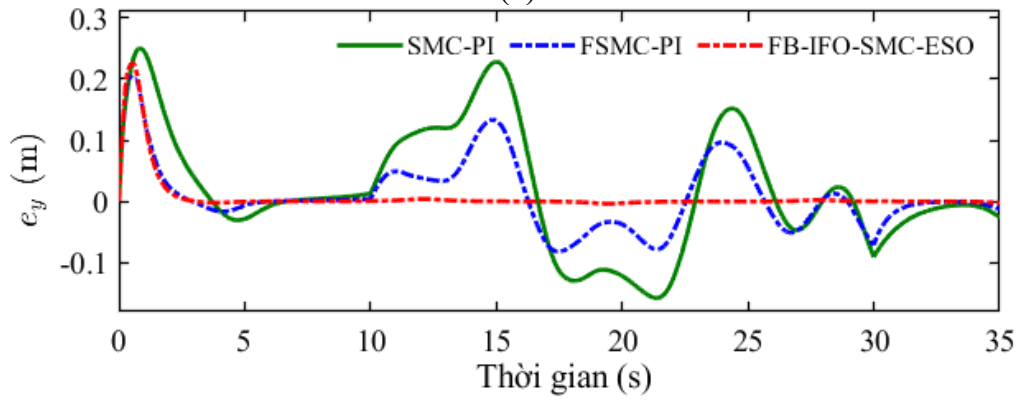
➤ Quỹ đạo hình số 8



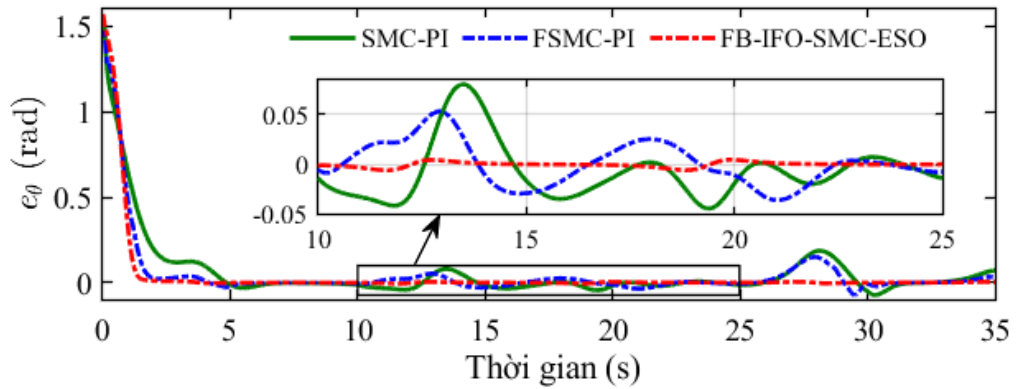
Hình 3.23. Ước lượng lỗi từ bộ IFO



(a)

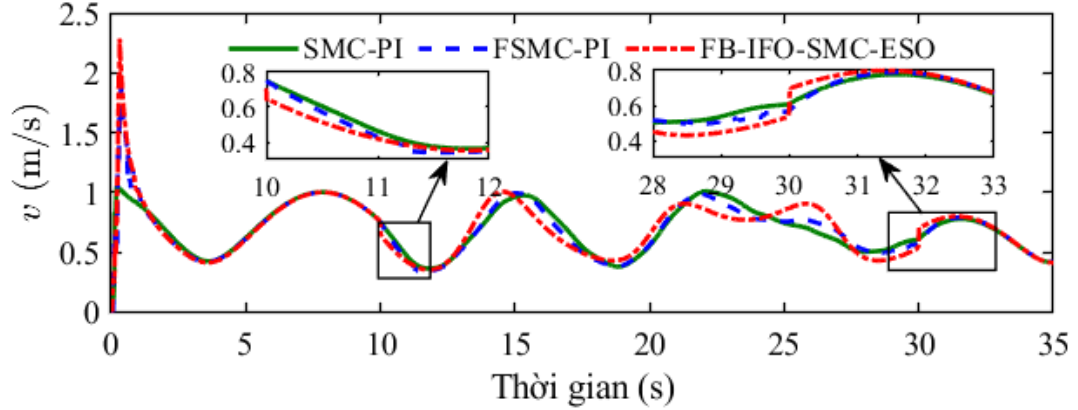


(b)

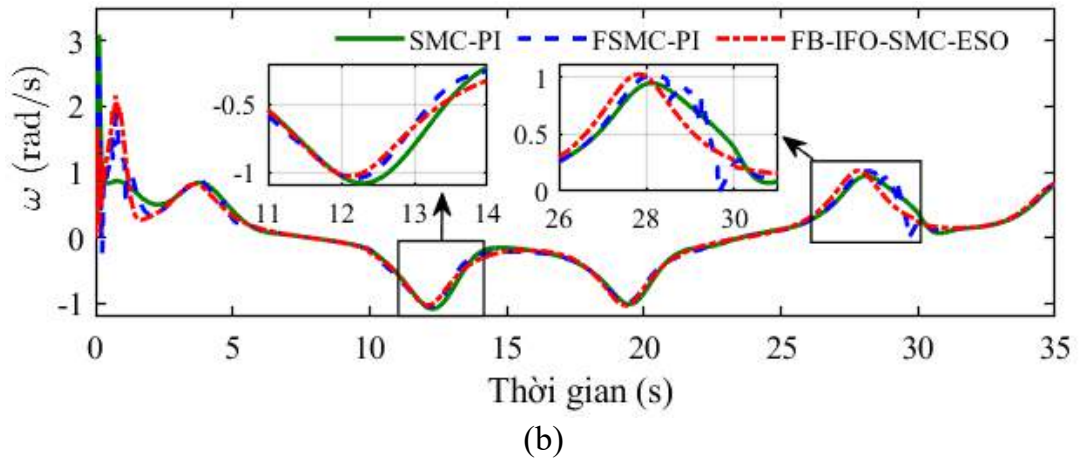


(c)

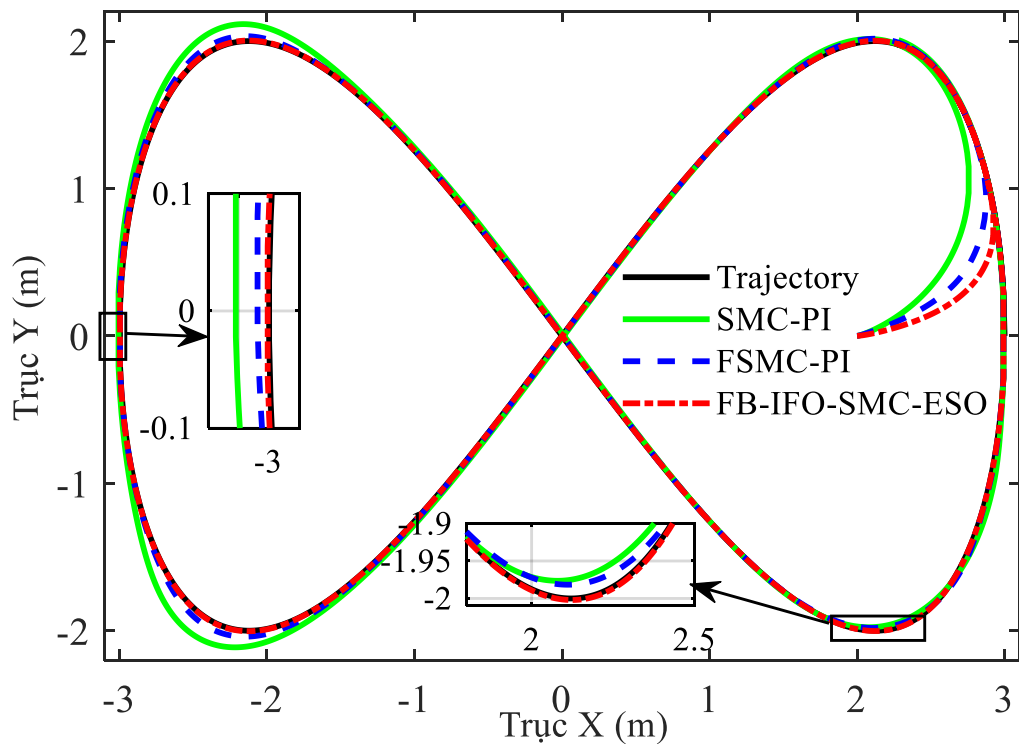
Hình 3.24. Sai lệch bám theo quỹ đạo hình số 8: (a) Trục X; (b) Trục Y; (c) Góc θ



(a)



Hình 3.25. Tín hiệu vận tốc đạt được: (a) vận tốc tịnh tiến, (b) vận tốc góc



Hình 3.26. Quỹ đạo bám của robot theo hình số 8

Hình 3.24–3.26 cho thấy kết quả bám quỹ đạo hình số tám trong điều kiện đồng thời tồn tại nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành. Nhờ sự hỗ trợ của bộ quan sát ESO và IFO, bộ điều khiển đề xuất duy trì chất lượng bám tốt hơn so với SMC và FSMC, thể hiện qua tốc độ hội tụ nhanh hơn, biên độ sai số nhỏ hơn và tín hiệu điều khiển mượt hơn. Cụ thể, theo các chỉ tiêu định lượng ở bảng 3.10, bộ điều khiển đề xuất đạt $MSE = 0,0084$, $MAE = 0,0222$, $RMSE = 0,0918$, $IAE = 0,7761$ và $ISE = 0,2944$. So với bộ điều khiển SMC, các chỉ tiêu MSE, MAE, RMSE, IAE và ISE lần lượt giảm khoảng 69,8%, 79,1%, 45,0%, 79,1% và 69,8%. So với FSMC, các chỉ tiêu tương ứng giảm khoảng 39,6%, 61,9%, 22,0%, 62,0% và 39,2%.

Bảng 3.9. Chỉ số hiệu năng bám theo sai số Euclid tổng (x, y) của SMC, FSMC, FB-IFO-SMC-ESO

Bộ điều khiển	MSE	MAE	RMSE	IAE	ISE
SMC without ESO	0.0278	0.1061	0.1669	3.7124	0.9742
FSMC without ESO	0.0139	0.0583	0.1177	2.0405	0.4843
FB-IFO-SMC-ESO	0.0084	0.0222	0.0918	0.7761	0.2944

Sai lệch bám theo trục (x), (y) và góc hướng của bộ điều khiển đề xuất hội tụ về lân cận không nhanh hơn và duy trì giá trị nhỏ hơn trong suốt quá trình mô phỏng, như thể hiện trên Hình 3.24(a), (b) và (c). Các tín hiệu vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc trong Hình 3.25 cũng cho thấy đáp ứng ổn định hơn, ít dao động hơn và phù hợp hơn với yêu cầu điều khiển trong điều kiện có lỗi. Hình 3.26 tiếp tục khẳng định quỹ đạo đạt được của bộ điều khiển đề xuất bám sát quỹ đạo đặt hơn so với hai bộ điều khiển còn lại. Các kết quả này cho thấy việc kết hợp ESO, IFO và luật điều khiển chịu lỗi đã cải thiện rõ rệt độ chính xác bám quỹ đạo, giảm sai số tích lũy và nâng cao tính ổn định của hệ thống.

3.4. Kết luận chương 3

Trong chương 3, luận án đã trình bày các chiến lược điều khiển chịu lỗi cho NWMR theo một lộ trình phát triển có hệ thống, từ các phương pháp phi mô hình đến các kiến trúc điều khiển tích hợp dựa trên mô hình và bộ quan sát. Trọng tâm của chương là khai thác sự phối hợp giữa quan sát nhiễu – lỗi và thiết kế điều khiển nhằm nâng cao độ bền vững và độ chính xác bám quỹ đạo của hệ thống.

Cụ thể, Mục 3.1 giới thiệu một chiến lược điều khiển chịu lỗi phi mô hình kết hợp i-PID thông minh và bộ quan sát lỗi, cho phép duy trì ổn định và cải thiện chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành mà không cần mô hình động lực học chính xác. Mục 3.2 mở rộng theo hướng điều khiển chịu lỗi chủ động dựa trên điều khiển trượt kết hợp hai bộ quan sát, cho phép ước lượng và bù trừ đồng thời nhiễu và lỗi, từ đó nâng cao đáng kể độ bền vững của hệ thống. Trên cơ sở đó, Mục 3.3 đề xuất một kiến trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng tích hợp nhiều bộ điều khiển và bộ quan sát, phân tách rõ ràng bài toán bám quỹ đạo và bài toán bù nhiễu – lỗi, phù hợp với các yêu cầu triển khai thực tế.

Kiến trúc điều khiển chịu lỗi tích hợp nhiều bộ điều khiển được trình bày trong chương 3 cho phép khai thác đồng thời ưu điểm của các phương pháp điều khiển khác nhau trong một kiến trúc hai vòng phân cấp, qua đó nâng cao đáng kể độ chính xác bám quỹ đạo và khả năng thích nghi của hệ thống trong điều kiện tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành và nhiễu bất định.

Kết quả nghiên cứu trình bày trong chương 3 đã được công bố trong các công trình [CT2], [CT5], [CT6], [CT7], [CT8], [CT9].

[CT2]. Sy Phuong Ho, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Thanh Tri Nguyen, Van Vy Phan, “*Fault-Tolerant Trajectory Tracking Control for Non-holonomic Mobile Robots Using HOICD-SMC*”, The 8th International Conference on Engineering Research and Applications ICERA 2025. **(SCOPUS-Q4)**

[CT5]. Sy Phuong Ho, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Van Du Phan, Kim Duyen Ha Thi, Thanh Tri Nguyen, Minh Dang Dau, Thu Uyen Le Thi, “*Fault-Tolerant Trajectory Tracking of Mobile Robots via Model-Free Intelligent PID and Fault Observer*”, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI), vol. 15, no. 1, February 2026, pp. 184~197, DOI: 10.11591/eei.v15i1.9884 **(SCOPUS-Q3)**

[CT6]. Sy Phuong Ho, Manh Tien Ngo, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Kim Duyen Ha Thi*, Thanh Tri Nguyen, Ngoc Phuoc Le, Viet Anh Dang, “*Dual-Observer based Framework for Fault-Tolerant Trajectory Tracking of Non-holonomic Wheeled Mobile Robots*”, J Robot Control (JRC), vol. 6, no. 6, pp. 2871–2882, Dec. 2025. DOI: 10.18196/jrc.v6i6.28586 **(SCOPUS-Q2)**

[CT7]. Van Du Phan, The Anh Mai, **Sy Phuong Ho**, Thai Son Dang, Van Chuong Le, Van Nam Dinh. “*Development of an Adaptive Integral Terminal Sliding Mode Tracking Control for a Wheeled Mobile Robot With Time Delay Estimation*”. *Int. J. Control Autom. Syst.* 23, 2399–2410 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12555-024-0747-x>. **(SCIE-Q2)**

[CT8]. Sy Phuong Ho, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Van Du Phan, Dinh Tu Duong, Van Vy Phan, “*Hybrid Fault-Tolerant Adaptive Controller for Robust Trajectory Tracking of Mobile Robots*”, Transactions of the Institute of Measurement and Control, pp. 1-11, 2026. Doi: 10.1177/01423312261449864 **(SCIE-Q2)**

[CT9]. Sy Phuong Ho, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Van Du Phan, Thai Son Dang, Dinh Tu Duong, Van Nam Dinh, Van Manh Tran, “*Robust Fault-tolerant Control based on the integration of controllers for Non-holonomic Mobile Robots with Disturbance Observers*”, International Journal of Control, Automation, and Systems. <https://doi.org/10.1007/s12555-026-00093-8> **(SCIE-Q2)**

CHƯƠNG 4

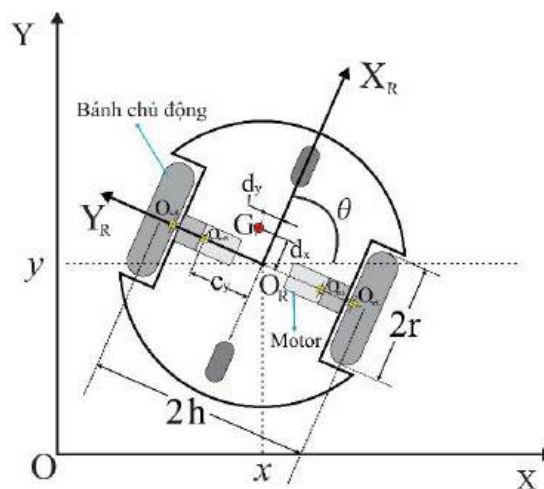
ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI VỚI RÀNG BUỘC HIỆU NĂNG CHO ROBOT DI ĐỘNG NON-HOLONOMIC

Trong các chương trước, luận án đã tập trung nghiên cứu các kiến trúc điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát cho NWMR, với trọng tâm là tổ chức điều khiển theo cấu trúc phân tầng động học–động lực học và khai thác thông tin quan sát để xử lý nhiễu, bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành. Các tiếp cận này cho thấy ưu thế về tính hệ thống, khả năng mở rộng và phù hợp với các kịch bản vận hành thực tế của robot di động. Tuy nhiên, bên cạnh các kiến trúc phân tầng, các chiến lược điều khiển một vòng có hiệu năng mạnh vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá giới hạn đáp ứng và chất lượng điều khiển có thể đạt được đối với NWMR. Đặc biệt, các yêu cầu về hội tụ nhanh và kiểm soát hành vi quá độ của sai số bám quỹ đạo ngày càng được quan tâm trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao [67], [74].

Xuất phát từ nhận định đó, Chương 4 tập trung nghiên cứu một chiến lược điều khiển chịu lỗi cho NWMR dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước. Mục tiêu của chương là phát triển một luật điều khiển có hiệu năng cao, đảm bảo hội tụ hữu hạn thời gian và chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành, trượt bánh xe và bất định mô hình.

4.1. Mô hình NWMR có xét lỗi cơ cấu chấp hành, lệch trọng tâm và trượt bánh

Mô hình NWMR với giả thiết lệch trọng tâm có cấu trúc như được minh họa trong Hình 4.1.



Hình 4.1. Cấu trúc của NWMR trong trường hợp trọng tâm bị lệch

Vận tốc góc của bánh phải và bánh trái lần lượt được ký hiệu là: $\omega_R = \dot{\varphi}_R, \omega_L = \dot{\varphi}_L$. Trong cấu hình này, tọa độ của tâm khối lượng robot là điểm G ; d là khoảng cách từ điểm O_R đến G . Các đại lượng ω_R và ω_L là vận tốc góc của bánh phải và bánh trái; v và ω lần lượt biểu diễn vận tốc tịnh tiến và vận tốc quay của robot.

Các thành phần trượt giả thiết bao gồm: Δ_{sl} là vận tốc trượt ngang; $\dot{\theta}_R$ và $\dot{\theta}_L$ là vận tốc góc bị nhiễu của bánh phải và bánh trái; δ_v là vận tốc trượt dọc; δ_ω là vận tốc góc bị nhiễu của robot do trượt bánh, với: $\delta_v = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L)$, $\delta_\omega = \frac{r}{2h}(\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)$. Trong quá trình vận hành dài hạn, địa hình và điều kiện môi trường có thể ảnh hưởng đến vận tốc thực tế đo được của động cơ như sau [3], [10]:

$$\begin{cases} \omega_R = (1 - \mu_R)\omega_1 = \omega_1 - \Delta\omega_1 \\ \omega_L = (1 - \mu_L)\omega_2 = \omega_2 - \Delta\omega_2 \end{cases}; 0 < \mu_i \leq 1 \quad (4.1)$$

trong đó ω_1, ω_2 là vận tốc góc mong muốn của bánh phải và bánh trái.

Do đó, vận tốc thực tế của robot được xác định như:

$$\begin{cases} v_{real} = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L) = v - \Delta v \\ \omega_{real} = \frac{r}{2h}(\omega_R - \omega_L) = \omega - \Delta\omega \end{cases} \quad (4.2)$$

Phương trình động học vị trí robot khi xét tới lệch trọng tâm:

$$\dot{q} = S_d \mathcal{G} \quad (4.3)$$

Trong đó: $S_d = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -d \sin \theta & d \cos \theta & 1 \end{bmatrix}^T$, $\mathcal{G} = [v \quad \omega]^T$

Khi xét đồng thời lỗi cơ cấu chấp hành, lệch trọng tâm và trượt bánh, các ràng buộc non-holonomic của robot được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} -\dot{x} \sin \theta + \dot{y} \cos \theta - d\dot{\theta} = \Delta_{sl} \\ \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta + h\dot{\theta} = r(\omega_1 - \Delta\omega_R) \Leftrightarrow A_p \dot{p} = \Delta_{FaS} \\ \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta - h\dot{\theta} = r(\omega_2 - \Delta\omega_L) \end{cases} \quad (4.4)$$

trong đó: $A_p = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & -d & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & h & -r & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -h & 0 & -r \end{bmatrix}$, $p = [q \quad \varphi]^T = [x \quad y \quad \theta \quad \varphi_R \quad \varphi_L]^T$

, $\Delta_{FaS} = [\Delta_{sl} \quad -r\Delta\omega_R \quad -r\Delta\omega_L]^T$

Ma trận S_p được xác định sao cho $S_p^T A_p^T = 0$ và động học của NWMR có thể được biểu diễn lại dưới dạng:

$$\dot{p} = S_p (\mathcal{G} - \Delta\mathcal{G}) + U_D \quad (4.5)$$

trong đó: $S_p = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 1/r & 1/r \\ -d \sin \theta & d \cos \theta & 1 & h/r & -h/r \end{bmatrix}^T$, $\Delta \mathcal{G} = [\delta_v + \Delta v \quad \delta_\omega + \Delta \omega]^T$,

$\mathcal{G} = [v \quad \omega]^T$, U_D là nhiễu không khớp sinh ra do ràng buộc non-holonomic bị nhiễu.

$$U_D = N\Lambda = [-\sin \theta \Delta_{sl} \quad \cos \theta \Delta_{sl} \quad 0 \quad \Delta \omega_R \quad \Delta \omega_L]^T$$

$$N = \begin{bmatrix} -\sin \theta & 0 & 0 \\ \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \Lambda = \begin{bmatrix} \Delta_{sl} \\ \Delta \omega_R \\ \Delta \omega_L \end{bmatrix}$$

Lấy đạo hàm theo thời gian của (4.5), ta thu được:

$$\ddot{p} = \dot{S}_p (\mathcal{G} - \Delta \mathcal{G}) + S_p (\dot{\mathcal{G}} - \Delta \dot{\mathcal{G}}) + \dot{U}_D \quad (4.6)$$

Phương trình động lực học của robot NWMR dưới dạng Lagrange được viết [20]:

$$M_p \ddot{p} + C_p(p, \dot{p}) \dot{p} + G_p + E_d = B_p \tau - A_p^T \lambda_p \quad (4.7)$$

Trong đó: M_p là ma trận quán tính xác định dương, C_p là ma trận Coriolis-ly tâm, G_p là vectơ trọng lực, E_d là nhiễu bên ngoài bị chặn, B_p là ma trận đầu vào, τ là mô-men điều khiển, λ_p là véc tơ hệ số lực ràng buộc.

$$M_p = \begin{bmatrix} m & 0 & -md \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & md \sin \theta & 0 & 0 \\ -md \sin \theta & -md \sin \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_W & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_W \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ 2h & -2h \\ r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix}$$

$$C_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -md\omega \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -md\omega \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, G_p = 0.$$

Thay (4.4), (4.6) vào (4.7) và nhân hai vế với S_p^T , ta được:

$$M_1 (\dot{\mathcal{G}} - \Delta \dot{\mathcal{G}}) + N_1 (\mathcal{G} - \Delta \mathcal{G}) + P_1 + S^T(q) E_d = B_1 \tau \quad (4.8)$$

trong đó:

$$M_1 = S_p^T M_p S_p; P_1 = S_p^T M_p \dot{U}_D + S_p^T C_p U_D; B_1 = S_p^T B_p; N_1 = S_p^T M_p \dot{S}_p + S_p^T C_p S_p.$$

Mô hình NWMR có thể được viết lại dưới dạng:

$$\dot{\mathcal{G}} = M \mathcal{G} + N \tau + D \quad (4.9)$$

trong đó: $D = \Delta M \mathcal{G} + \Delta N \tau + M_1^{-1} N_1 \Delta \mathcal{G} + \Delta \dot{\mathcal{G}} - M_1^{-1} (P_1 + S_p^T E_d)$ $M = -M_1^{-1} N_1$;
 $N = M_1^{-1} B_1$; , $\Delta M, \Delta N$ biểu diễn các bất định tham số.

Đặt $z_1 = q$, $z_2 = S_d \mathcal{G}$, $z_3 = S_d D$,. Do $S_d \in R^{3 \times 2}$ là ma trận hạng cột đầy đủ, tồn tại nghịch đảo Moore-Penrose trái: $S_d^\dagger = (S_d^T S_d)^{-1} S_d^T$ sao cho $\mathcal{G} = S_d^\dagger z_2$.

Kết hợp (4.3) và (4.9), với giả thiết $D, \dot{D}$, q và $\mathcal{G}$ đều bị chặn ta thu được hệ không gian trạng thái cho NWMR:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = N\tau + Q + z_3 \\ \dot{z}_3 = \Delta_d \end{cases} \quad (4.10)$$

trong đó: $N = S_d N$, $Q = (\dot{S}_d S_d^\dagger + S_d M S_d^\dagger) z_2$, $\Delta_d = \dot{S}_d D + S_d \dot{D}$

Để đạt được các mục tiêu điều khiển và đảm bảo tính ổn định của hệ thống, trong phần này NCS thiết lập một số giả thiết cơ bản và bổ đề làm nền tảng cho việc thiết kế bộ điều khiển trượt tích phân toàn cục dựa trên bộ quan sát thích nghi cho NWMR.

Nhận xét 4.1: Trong mô hình (4.10), nhiễu không chỉ bao gồm các lực bên ngoài, lệch trọng tâm mà còn bao gồm các tác động bên trong như trượt bánh Δ_{sl} và lỗi cơ cấu chấp hành $\Delta\omega_R, \Delta\omega_L$. Trượt bánh xuất hiện như nhiễu phù hợp trong phương trình ràng buộc non-holonomic, trong khi lỗi cơ cấu chấp hành được mô hình hóa như lỗi lệch trong vận tốc bánh xe. Các tác động này được gộp vào nhiễu tổng hợp D trong (4.10) để ước lượng và bù thống nhất, cho phép bộ quan sát nhiễu cải tiến xử lý đồng thời cả nhiễu và lỗi.

Nhận xét 4.2: Mục tiêu điều khiển là thiết kế một thuật toán GISMC dựa trên bộ quan sát thích nghi cho hệ (4.10) sao cho:

- Chuyển động đầu ra z_1 bám chính xác quỹ đạo mong muốn z_{1d} , trong đó sai số bám được đảm bảo thỏa các tiêu chí hiệu năng định trước và hội tụ trong thời gian hữu hạn.
- Sai số ước lượng của bộ quan sát nhiễu cải tiến hội tụ vào một miền bị chặn trong một khoảng thời gian xác định.

Mục tiêu điều khiển này đảm bảo rằng hiệu năng bám quỹ đạo của NWMR được duy trì ngay cả khi tồn tại các bất định, chẳng hạn như lỗi cơ cấu chấp hành và trượt bánh. Việc đảm bảo hội tụ trong thời gian hữu hạn giúp hệ thống duy trì tính ổn định và khả năng đáp ứng nhanh trước các thay đổi động của môi trường, điều này đặc biệt quan trọng đối với các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao.

Giả thiết 4.1: Đề hỗ trợ mục tiêu điều khiển, NCS đưa ra các giả thiết sau đối với tín hiệu bám mục tiêu và các cận của nhiễu:

- a) Quỹ đạo đặt z_{1d} và đạo hàm của nó $\dot{z}_{1d}$ đều bị chặn.
- b) Tồn tại các cận trên đối với nhiễu tổng hợp D và đạo hàm của nó $\dot{D}$ sao cho:
 $|D| < d_m$ và $|\dot{D}| < D_m$

trong đó d_m và D_m là các hằng số dương biểu diễn các giới hạn của các thành phần nhiễu tương ứng.

Các giả thiết này là cần thiết để đảm bảo rằng đầu vào hệ thống và các nhiễu đều nằm trong các giới hạn có thể dự đoán. Giả thiết (a) đối với tín hiệu mục tiêu đảm bảo rằng quỹ đạo mong muốn là thực tế và có thể đạt được bởi bộ điều khiển. Giả thiết (b) giới hạn nhiễu bên ngoài, cho phép bộ điều khiển bù nhiễu hiệu quả và duy trì ổn định mà không gây ra quá điều khiển.

Bổ đề 4.1 [65, 66]: Để đảm bảo tính ổn định trong thời gian hữu hạn, NCS áp dụng bổ đề sau cho động học của hệ thống: Xét hệ phi tuyến $\dot{x} = f(x)$, trong đó $L(x)$ là một hàm xác định dương, liên tục và khả vi trơn. Nếu tồn tại bất đẳng thức sau:

$$\dot{L}(x) \leq -\mu_1 L(x) - \mu_2 L^\beta(x) + \chi \quad (4.11)$$

trong đó $\mu_1, \mu_2, \beta, \chi$ là các hằng số dương thỏa $0 < \beta < 1, 0 < \chi < \infty$, thì các điểm cân bằng của hệ $\dot{x} = f(x)$ là ổn định thực tế trong thời gian hữu hạn (practical finite-time stable), và thời gian hội tụ T thỏa mãn:

$$T \leq T_p = \max \left\{ \begin{aligned} &t_0 + \frac{1}{\gamma_0 \mu_1 (1-\beta)} \ln \frac{\gamma_0 \mu_1 L^{1-\beta}(t_0) + \mu_2}{\mu_2}; \\ &t_0 + \frac{1}{\mu_1 (1-\beta)} \ln \frac{\mu_1 L^{1-\beta}(t_0) + \gamma_0 \mu_2}{\gamma_0 \mu_2} \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

trong đó t_0 , là thời điểm ban đầu, $0 < \gamma_0 < 1$. Trạng thái của hệ x sẽ được dẫn vào một tập compact được xác định bởi:

$$x \in \left\{ x : \lim_{t \rightarrow T_p} L(x) \leq \min \left\{ \frac{\chi}{(1-\gamma_0)\mu_1}, \left(\frac{\chi}{(1-\gamma_0)\mu_2} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right\} \right\} \quad (4.13)$$

Việc áp dụng ổn định trong thời gian hữu hạn đảm bảo rằng trạng thái của hệ thống hội tụ trong một khoảng thời gian xác định, bất chấp sự tồn tại của nhiễu bên ngoài và các bất định của hệ thống. Bổ đề này cho phép chiến lược điều khiển xử lý hiệu quả các bất định bằng cách chặn sai số và đảm bảo khả năng ổn định nhanh, điều này là thiết yếu để duy trì điều khiển chính xác trong điều kiện có lỗi.

4.2. Điều khiển trượt tích phân toàn cục kết hợp với bộ quan sát nhiễu cải tiến

Dựa trên Giả thiết 4.1 và Bổ đề 4.1 đã được thiết lập trong Mục 4.1, NCS tiến hành phát triển một chiến lược điều khiển trượt tích phân toàn cục dựa trên bộ quan sát thích nghi, được thiết kế chuyên biệt nhằm xử lý lỗi cơ cấu chấp hành và hiện tượng trượt bánh trong NWMR. Phần này trình bày một cách có hệ thống việc xây dựng chiến lược điều khiển nhằm đáp ứng các mục tiêu về độ chính xác bám quỹ đạo và tính ổn định đã được nêu trong Nhận xét 4.2.

4.2.1. Bộ quan sát nhiễu cải tiến

Để đối phó với các nhiễu không xác định, một bộ quan sát nhiễu cải tiến (Improved Disturbance Observer – IDO) được xây dựng nhằm cung cấp khả năng ước lượng theo thời gian thực cả nhiễu bên trong và nhiễu bên ngoài, qua đó nâng cao khả năng của bộ điều khiển trong việc bù động học đối với các biến thiên phát sinh từ lỗi và hiện tượng trượt:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + 4\xi_1 e_{z1} \\ \dot{\hat{z}}_2 = N\tau + Q + \hat{z}_3 + 4\xi_1^2 e_{z1} \\ \dot{\hat{z}}_3 = \xi_1^3 e_{z1} + \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d) \end{cases} \quad (4.14)$$

trong đó $e_{z_i} = z_i - \hat{z}_i$ ($i = 1, 2, 3$) là sai số ước lượng của z_i ; $\hat{z}_i$ là giá trị ước lượng của z_i . $\xi_1 > 0$, σ_d là các hệ số của hàm, đảm bảo rằng sai số của bộ quan sát luôn bị chặn, như đã được chứng minh trong Bổ đề 4.1.

Từ (4.10) và (4.14), phương trình vi phân của sai số quan sát có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{e}_{z1} = e_{z2} - 4\xi_1 e_{z1} \\ \dot{e}_{z2} = e_{z3} - 4\xi_1^2 e_{z1} \\ \dot{e}_{z3}(t) = \Delta_d - \xi_1^3 e_{z1} - \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d) \end{cases} \quad (4.15)$$

trong đó $\hat{\beta}_{IDO}$ là giá trị ước lượng của β_{IDO} - hệ số thích nghi được thiết kế.

Đặt: $\psi = [\psi_1 \quad \psi_2 \quad \psi_3]^T = \begin{bmatrix} e_{z1} & \frac{e_{z2}}{\xi_1} & \frac{e_{z3}}{\xi_1^2} \end{bmatrix}^T$ là vector sai số ước lượng đã

được chuẩn hóa, và $\delta = (\Delta_d - \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d)) / \xi_1^2$, khi đó (4.15) có thể được mô tả lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = -4\xi_1 \psi_1 + \xi_1 \psi_2 \\ \dot{\psi}_2 = -4\xi_1 \psi_1 + \xi_1 \psi_3 \\ \dot{\psi}_d(t) = -\xi_1 \psi_1 + (\Delta_d - \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d)) / \xi_1^2 \end{cases} \quad (4.16)$$

Ta có thể biểu diễn đạo hàm theo thời gian của ψ như sau:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \xi_1 A_m \psi + B_m \delta \\ y = C_m \psi \end{cases} \quad (4.17)$$

trong đó A_m , B_m và C_m là các ma trận được thiết kế và được xác định:

$$A_m = \begin{bmatrix} -4 & 1 & 0 \\ -4 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; C_m = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Do A_m là ma trận Hurwitz, một ma trận xác định dương P_m được đưa vào nhằm đảm bảo $A_m^T P_m + P_m A_m = -2I_U$ trong đó I_U là ma trận đơn vị bậc 3.

$$P_m = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 5 & -3 & -5 \\ -3 & 5 & -3 \\ -5 & -3 & 29 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Hệ số thích nghi $\hat{\beta}_{IDO}$ được thiết kế theo (4.19):

$$\dot{\hat{\beta}}_{IDO} = \frac{\alpha_1}{\xi_1} \psi^T P_m B_m \tanh(\sigma_d) \quad (4.19)$$

trong đó $\alpha_1 > 0$ là tham số điều chỉnh; $\sigma_d = \psi^T P_m B_m$, với $\hat{\beta}_{IDO}$ thỏa mãn điều kiện:

$$\beta_{IDO} > \bar{\Delta}_1 \quad (4.20)$$

Với $\bar{\Delta}_1$ là cận trên của Δ_d .

Nhận xét 4.3. Giá trị thời gian thực của hệ số thích nghi $\hat{\beta}_{IDO}$ có thể được xác định bằng cách tích phân (4.19). Điều này cho phép bộ IDO điều chỉnh động $\hat{\beta}_{IDO}$ để đáp ứng với các mức nhiễu thay đổi, đảm bảo rằng bộ quan sát luôn bền vững và có khả năng thích nghi trong các điều kiện vận hành khác nhau. Quá trình tích phân, như được trình bày trong [67], đảm bảo sự hội tụ trơn của $\hat{\beta}_{IDO}$, từ đó ổn định sai số quan sát theo thời gian.

$$\hat{\beta}_{IDO} = \frac{\alpha_1}{2\xi_1} \left[\frac{3}{\xi_1} |\psi_1| + 5 \int_0^t |\psi_1(\tau)| d\tau \right] \quad (4.21)$$

Nhận xét 4.4. Giá trị lỗi vận tốc ước lượng ($\hat{F}_v$) từ bộ quan sát sẽ được tính toán và suy ra từ phương trình bộ quan sát (4.14). Khi giá trị này vượt quá ngưỡng phát hiện lỗi, lỗi sẽ được phát hiện và một cảnh báo sẽ được kích hoạt; ngược lại, nếu không vượt ngưỡng, thì không có lỗi nào được phát hiện. Mô hình phát hiện lỗi có thể được biểu diễn như sau:

$$F_D = \begin{cases} 1 & \text{if } \|\hat{F}_v\| > threshold \\ 0 & \text{if } \|\hat{F}_v\| \leq threshold \end{cases} \quad (4.22)$$

Định lý 4.1. Đối với hệ thống robot được mô tả bởi (4.10), bộ quan sát IDO được thiết kế trong (4.14) đảm bảo rằng, với các giá trị đủ lớn của các hệ số khuếch đại bộ quan sát ξ_1 và $\alpha_1 > 0$, tất cả các tín hiệu sai số quan sát đều bị chặn khi $t \rightarrow \infty$. Tính bị chặn này đảm bảo rằng IDO có thể ước lượng chính xác các nhiễu theo thời gian, đồng thời duy trì tính ổn định và hiệu năng của hệ thống điều khiển trong các điều kiện bất định.

Chứng minh:

Xét hàm Lyapunov:

$$V_{IDO} = \frac{1}{2} \psi^T P_m \psi \quad (4.23)$$

trong đó P_m là một ma trận xác định dương thể hiện trong (4.18).

Đạo hàm theo thời gian của V_{IDO} được tính như sau:

$$\dot{V}_{IDO} = \frac{1}{2} \dot{\psi}^T P_m \psi + \frac{1}{2} \psi^T P_m \dot{\psi} \quad (4.24)$$

Thay (4.18) vào (4.24), ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{IDO} &= \frac{1}{2} (\xi_1 A_m \psi + B_m \delta)^T P_m \psi + \frac{1}{2} \psi^T P_m (\xi_1 A_m \psi + B_m \delta) \\ &= -\xi_1 \psi^T \psi + \psi^T F_m \end{aligned} \quad (4.25)$$

trong đó: $F_m = P_m B_m (\Delta_d - \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d)) / \xi_1^2$.

Trong chứng minh này $\|\cdot\|_2$ được sử dụng để ký hiệu chuẩn Euclid đối với vector và chuẩn cảm sinh tương ứng đối với ma trận. Giả sử tồn tại hằng số dương ζ_1 sao cho thành phần bất định F_m thỏa mãn $\|F_m\|_2 \leq \zeta_1 \|P_m B_m\|_2 \|\psi\|_2$. Khi đó, từ (4.25) áp dụng bất đẳng thức Cauchy–Schwarz, ta có

$$\dot{V}_{IDO} \leq -\xi_1 \|\psi\|_2^2 + \|\psi\|_2 \|F_m\|_2 \quad (4.26a)$$

Suy ra

$$\dot{V}_{IDO} \leq -(\xi_1 - \zeta_1 \|P_m B_m\|_2) \|\psi\|_2^2 \quad (4.26b)$$

Nếu chọn hệ số khuếch đại quan sát ξ_1 đủ lớn sao cho $\xi_1 > \zeta_1 \|P_m B_m\|_2$ thì $\dot{V}_{IDO}$ là âm bán xác định với mọi $\psi \neq 0$. Điều này dẫn đến kết luận rằng sai số ước

lượng của bộ IDO được thiết kế là bị chặn. Cụ thể $e_{x1} \leq e_{x1m}, e_{x1m} > 0$.

Như vậy, chứng minh được hoàn tất.

Dựa trên các bổ đề kỹ thuật nền tảng và các hàm quan trọng đã được trình bày, phương pháp điều khiển trượt tích phân toàn cục dựa trên bộ quan sát kết hợp với điều khiển PPC được đề xuất.

4.2.2. Điều khiển trượt tích phân toàn cục với ràng buộc hiệu năng định trước

Trạng thái sai số được định nghĩa như sau:

$$e = z_1 - z_{1d} \quad (4.27)$$

Hàm hiệu năng định trước PPF là một hàm được chọn trước để quy định miền sai số cho phép theo thời gian. Trong khi đó, PPC là phương pháp thiết kế điều khiển nhằm đảm bảo sai số thực sự luôn nằm trong miền được quy định bởi PPF. Do đó, PPF là biên hiệu năng mong muốn, còn PPC là cơ chế điều khiển để cưỡng bức sai số tuân thủ biên đó.

Định nghĩa 4.1. Hàm hiệu năng định trước (PPF) [68], ký hiệu là $\rho(t)$, là một hàm liên tục dùng để xác định các giới hạn cho phép của sai số bám theo thời gian:

$$\rho(t) = (\rho_0 - \rho_\infty) \exp(-ct) + \rho_\infty \quad (4.28)$$

trong đó:

- $c > 0$ tham số quyết định tốc độ hội tụ;
- ρ_0 là giới hạn hiệu năng ban đầu, biểu thị sai số lớn nhất cho phép tại $t = 0$;
- ρ_∞ là giới hạn hiệu năng ở trạng thái xác lập, khi $t \rightarrow \infty$.

Hàm này đảm bảo rằng sai số bám $e(t)$ luôn nằm trong các giới hạn được chỉ định trong suốt quá trình hoạt động. Cụ thể, $\rho(t)$ bắt đầu từ ρ_0 khi $t \rightarrow 0$ và tiệm cận đến ρ_∞ khi $t \rightarrow \infty$, qua đó đảm bảo sự suy giảm có kiểm soát của sai số theo thời gian, với $\rho_0 > \rho_\infty$.

Yêu cầu hiệu năng định trước đối với sai số bám $e(t)$ được mô tả bởi

$$-\varsigma_d \rho(t) < e(t) < \varsigma_u \rho(t), t > 0 \quad (4.29a)$$

trong đó $\varsigma_d > 0$ và $\varsigma_u > 0$ là các hằng số được xác định trước, lần lượt dùng để điều chỉnh cận dưới và cận trên của sai số bám. Các cận này giúp duy trì sai số bám trong một miền mong muốn theo quy định của hàm PPF $\rho(t)$, qua đó đảm bảo hệ thống thỏa mãn các tiêu chí hiệu năng định trước.

Để chuẩn hóa ràng buộc trên, định nghĩa sai số chuẩn hóa

$$\varsigma_{se}(t) = \frac{e(t)}{\rho(t)} \quad (4.29b)$$

Khi đó, điều kiện PPC trong (4.29) được viết lại thành

$$-\varsigma_d < \varsigma_{se}(t) < \varsigma_u \quad (4.29c)$$

Nhằm chuyển bài toán điều khiển có ràng buộc thành bài toán ổn định của một biến sai số không bị ràng buộc, đưa vào biến đổi $\varsigma_{se}(t) = H(\varepsilon^*(t))$, trong đó $\varepsilon^*(t) \in R$ là sai số biến đổi và hàm $H: \mathbb{R} \rightarrow (-\varsigma_d, \varsigma_u)$ được chọn là

$$H(\varepsilon^*) = \frac{\varsigma_u \exp(\varepsilon^*) - \varsigma_d \exp(-\varepsilon^*)}{\exp(\varepsilon^*) + \exp(-\varepsilon^*)} \quad (4.30)$$

Do đó, sai số bám ban đầu được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{aligned} e(t) &= \rho(t)H(\varepsilon^*(t)) \\ e &= \rho H(\varepsilon^*) \end{aligned} \quad (4.31)$$

Phép biến đổi này cho phép sai số bám $e(t)$ được tỷ lệ hóa bởi $\rho(t)$, qua đó đảm bảo sai số luôn nằm trong các cận hiệu năng được xác định bởi PPF.

Sử dụng **Định nghĩa 4.1**, ta suy ra phép biến đổi ngược để biểu diễn ε^* theo $e(t)$ và $\rho(t)$:

$$\varepsilon^* = H^{-1}(\varsigma_{se}) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\varsigma_d + \varsigma_{se}}{\varsigma_u - \varsigma_{se}} \right) \quad (4.32a)$$

Phép biến đổi ngược H^{-1} này cho phép tính trực tiếp biến ε^* từ sai số bám $e(t)$ và $\rho(t)$, qua đó tạo thuận lợi cho việc cưỡng bức các ràng buộc sai số bám thông qua một biến đã được biến đổi. Công thức (4.32) cho thấy khi $e(t)$ tiến gần đến biên trên $\varsigma_u \rho(t)$ hoặc biên dưới $-\varsigma_d \rho(t)$, mẫu số hoặc tử số của biểu thức logarit tiến về 0, làm cho ε^* tiến tới vô hạn. Vì vậy, nếu luật điều khiển đảm bảo ε^* bị chặn, thì sai số $e(t)$ không thể chạm hoặc vượt qua các biên PPC (4.29) đặt ra, qua đó đảm bảo tính bị chặn và hành vi hội tụ theo hiệu năng định trước [69].

Để thuận tiện cho việc triển khai luật điều khiển, đạo hàm $\varsigma_{se}(t)$ ta có:

$$\dot{\varsigma}_{se} = \frac{1}{\rho} \left(\dot{e} - \frac{\dot{\rho}}{\rho} e \right)$$

Mặt khác, từ (4.32) ta rút ra:

$$\dot{\varepsilon}^* = r_\varepsilon(t) \left(\dot{e} - \frac{\dot{\rho}}{\rho} e \right) \quad (4.32b)$$

Trong đó: $r_\varepsilon(t) = \frac{1}{2\rho(t)} \left(\frac{1}{\varsigma_{se} + \varsigma_d} + \frac{1}{\varsigma_u - \varsigma_{se}} \right)$, $\dot{e} = \hat{z}_2 - \dot{z}_{1d}$, với $\hat{z}_2$ là giá trị

ước lượng của z_2 từ bộ quan sát IDO.

Để xác định động học của hệ đã biến đổi, mặt trượt tích phân toàn cục δ được chọn dưới dạng:

$$\delta = \hat{z}_2 + 2\kappa_0 \varepsilon^* + \kappa_0^2 \int_0^t \varepsilon^* d\tau - p(t) \quad (4.33)$$

trong đó $\kappa_0 > 0$ là tham số thiết kế, $p(t) = p(0)\exp(-\kappa_0 t)$, với $p(0) = \hat{z}_2(0) + 2\kappa_0 \varepsilon^*(0) + \kappa_0^2 \int_0^t \varepsilon^*(0) d\tau$.

Đạo hàm theo thời gian của δ được xác định như sau:

$$\dot{\delta} = \dot{\hat{z}}_2 + 2\kappa_0 \dot{\varepsilon}^* + \kappa_0^2 \varepsilon^* - \dot{p}(t) \quad (4.34)$$

Thay các phương trình (4.14), (4.32b) và (4.34) vào biểu thức trên, ta thu được:

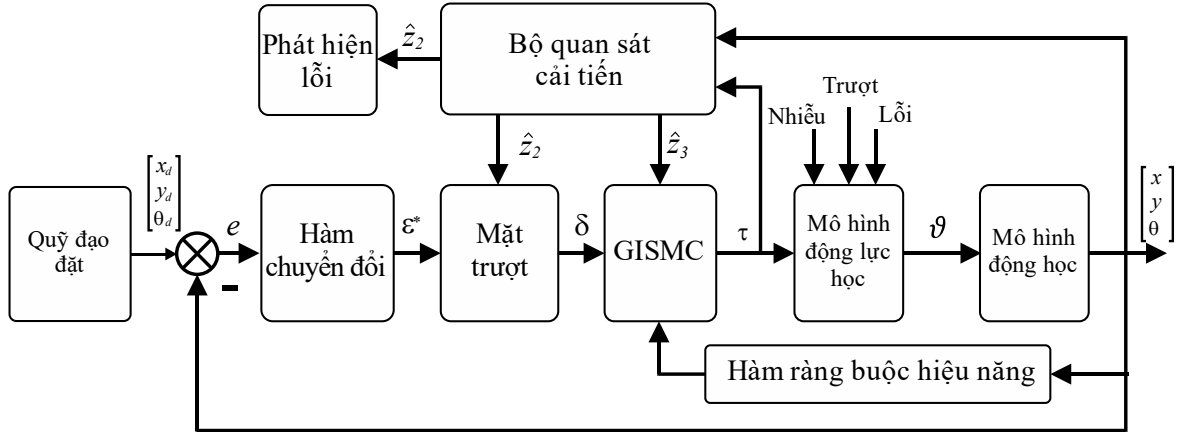
$$\dot{\delta} = N\tau + Q + \hat{z}_3 + 4\xi_1^2 e_{z1} + 2\kappa_0 \dot{\varepsilon}^* + \kappa_0^2 \varepsilon^* - \dot{p}(t) \quad (4.35)$$

Từ (4.35), tín hiệu điều khiển được xây dựng như sau:

$$\tau_{GISMC} = N^\dagger \left(-Q - 2\kappa_0 \dot{\varepsilon}^* - \kappa_0^2 \varepsilon^* + \dot{p}(t) - \hat{z}_3 - \kappa_2 \delta - \kappa_1 \tanh(s) \right) \quad (4.36)$$

trong đó $\kappa_1 > 0$ và $\kappa_2 > 0$ là các tham số thiết kế, $N^\dagger = (N^T N)^{-1} N^T$.

Cấu trúc của bộ điều khiển đề xuất cho hệ NWMR được minh họa trong Hình 4.2.



Hình 4.2. Sơ đồ khối của bộ điều khiển GISMC-PPF.

Cấu trúc điều khiển này có thể hiểu theo ba lớp: Lớp thứ nhất là PPF/PPC, có nhiệm vụ quy định và cưỡng bức sai số bám nằm trong miền hiệu năng mong muốn. Lớp thứ hai là IDO, có nhiệm vụ ước lượng nhiễu tổng hợp do trượt bánh, lỗi cơ cấu chấp hành và bất định mô hình. Lớp thứ ba là GISMC, có nhiệm vụ bảo đảm tính bền vững và hội tụ hữu hạn thời gian của sai số đã biến đổi. Nhờ đó, bộ điều khiển không chỉ làm cho sai số bám hội tụ, mà còn kiểm soát được cả hành vi quá độ của sai số.

Định lý 4.2. Đối với hệ thống NWMR được mô tả bởi (4.10), dưới Giả thiết 4.1 và Bổ đề 4.1, bộ quan sát được thiết kế trong (4.14), ràng buộc hiệu năng định trước (4.29), phép biến đổi sai số (4.30)–(4.32b) và luật điều khiển GISMC (4.36). Do đó, tất cả các trạng thái của hệ thống đều bị chặn, sai số bám hội tụ về miền biên được xác định trước.

Chứng minh:

Xét hàm Lyapunov:

$$V_{GISMC} = \frac{1}{2} \delta^2 \quad (4.37)$$

Đạo hàm theo thời gian của V_{GISMC} được tính như sau:

$$\dot{V}_{GISMC} = \delta \dot{\delta} = \delta \left(N\tau + Q + \hat{z}_3 + 4\xi_1^2 e_{z1} + 2\kappa_0 \dot{\varepsilon}^* + \kappa_0^2 \varepsilon^* - \dot{p}(t) \right) \quad (4.38)$$

Thay (4.35) vào (4.38), ta thu được:

$$\dot{V}_{GISMC} = -\kappa_1 |\delta| - \kappa_2 \delta^2 - 4\delta \xi_1^2 e_{z1} \quad (4.39)$$

Sử dụng bất đẳng thức Young, ta có:

$$-4\delta \xi_1^2 e_{z1} \leq \delta^2 + 4\xi_1^4 e_{z1}^2 \quad (4.40)$$

Từ (4.39) sang (4.40), suy ra:

$$\dot{V}_{GISMC} = -\kappa_1 |\delta| - (\kappa_2 - 1) \delta^2 + 4\xi_1^4 e_{z1}^2 = -\kappa_1 V_{GISMC}^{\frac{1}{2}} - (\kappa_2 - 1) V_{GISMC} + \chi_0 \quad (4.41)$$

Dựa trên Bổ đề 4.1, các trạng thái sai số của hệ thống NWMR sẽ được dẫn vào chế độ trượt $\delta = 0$ trong một thời gian hữu hạn xác định trước T_c . Thời gian hữu hạn T_c được xác định theo (4.13).

4.3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

4.3.1. Thiết lập mô phỏng

Để đánh giá một cách toàn diện tính bền vững và khả năng chịu lỗi của bộ điều khiển GISMC, hai bộ điều khiển bền vững khác là ASMC và SMC-IDO được sử dụng để so sánh. Một kịch bản mô phỏng duy nhất được thiết kế với ba giai đoạn vận hành liên tiếp, dưới các mức bất định tăng dần theo thời gian.

Tổng thời gian mô phỏng được thiết lập là 45 giây, trong đó robot bám theo quỹ đạo tham chiếu (4.42):

$$x_d = 5 \cos(0.2t), \quad y_d = 5 \sin(0.2t), \quad \theta_d = 0.2t \quad (4.42)$$

bắt đầu từ trạng thái ban đầu: $q(0) = [4 \quad 0 \quad 0]^T$

Các tham số mô hình của robot NWMR và các hệ số điều khiển được liệt kê trong Bảng 4.1 – 4.2. Toàn bộ quá trình được chia thành ba giai đoạn như sau:

- Giai đoạn I (0 s – 15 s): Robot hoạt động trong điều kiện danh định, chỉ chịu ảnh hưởng của độ lệch tham số mô hình 10% ($\Delta M = 0.1M, \Delta N = 0.1N$), không có nhiễu bên ngoài, trượt bánh hoặc lỗi cơ cấu chấp hành.

Giai đoạn này được sử dụng để đánh giá độ chính xác bám quỹ đạo cơ bản và hiệu năng xác lập của các bộ điều khiển trong điều kiện gần lý tưởng.

- Giai đoạn II (15 s – 25 s): Ngoài các thành phần nhiễu bất định ở mô hình, robot còn chịu tác động của nhiễu bên ngoài và trượt bánh, được biểu diễn bởi:

$\Delta_S = [\delta_{sl} \quad -r\varpi_R \quad -r\varpi_L]^T$ trong đó $\delta_{sl} = 5 + 0.8\sin(t)$, $\varpi_R = \beta \sin(t)$, $\varpi_L = \beta \cos(t)$, với $0 < \beta < 0.2$ là hệ số thay đổi ngẫu nhiên.

Giai đoạn này dùng để đánh giá khả năng của bộ quan sát trong việc ước lượng và bù nhiễu tổng hợp.

- Giai đoạn III (25 s – 35 s): Hệ thống tiếp tục chịu lỗi cơ cấu chấp hành dưới dạng mất hiệu quả từng phần: $\Delta v = \varepsilon v$, $\Delta \omega = \varepsilon \omega$ ($0.25 < \varepsilon < 0.35$). Do đó, robot đồng thời phải đối mặt với sai lệch mô hình, nhiễu bên ngoài, trượt bánh và suy giảm cơ cấu chấp hành.

Giai đoạn này được sử dụng để đánh giá khả năng chịu lỗi và hiệu năng thích nghi của bộ điều khiển được đề xuất.

Trong toàn bộ các giai đoạn, vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của robot được ràng buộc trong các miền thực tế: $v \leq 2m/s$, $|\omega| \leq 2.5rad/s$

Bảng 4.1. Các tham số của robot NWMR có xét đến lệch trọng tâm và trượt bánh

Tham số	Ký hiệu	Giá trị
Khối lượng toàn bộ khung robot	m (kg)	15
Bán kính bánh xe	r (m)	0.1
Mô men quán tính tổng	I (kg·m ²)	0.537
Mô men quán tính bánh dẫn động	I_w (kg·m ²)	0.0023
Khoảng cách giữa hai bánh dẫn động	$2h$ (m)	0.4
Khoảng cách từ điểm O_b đến G	d (m)	0.02

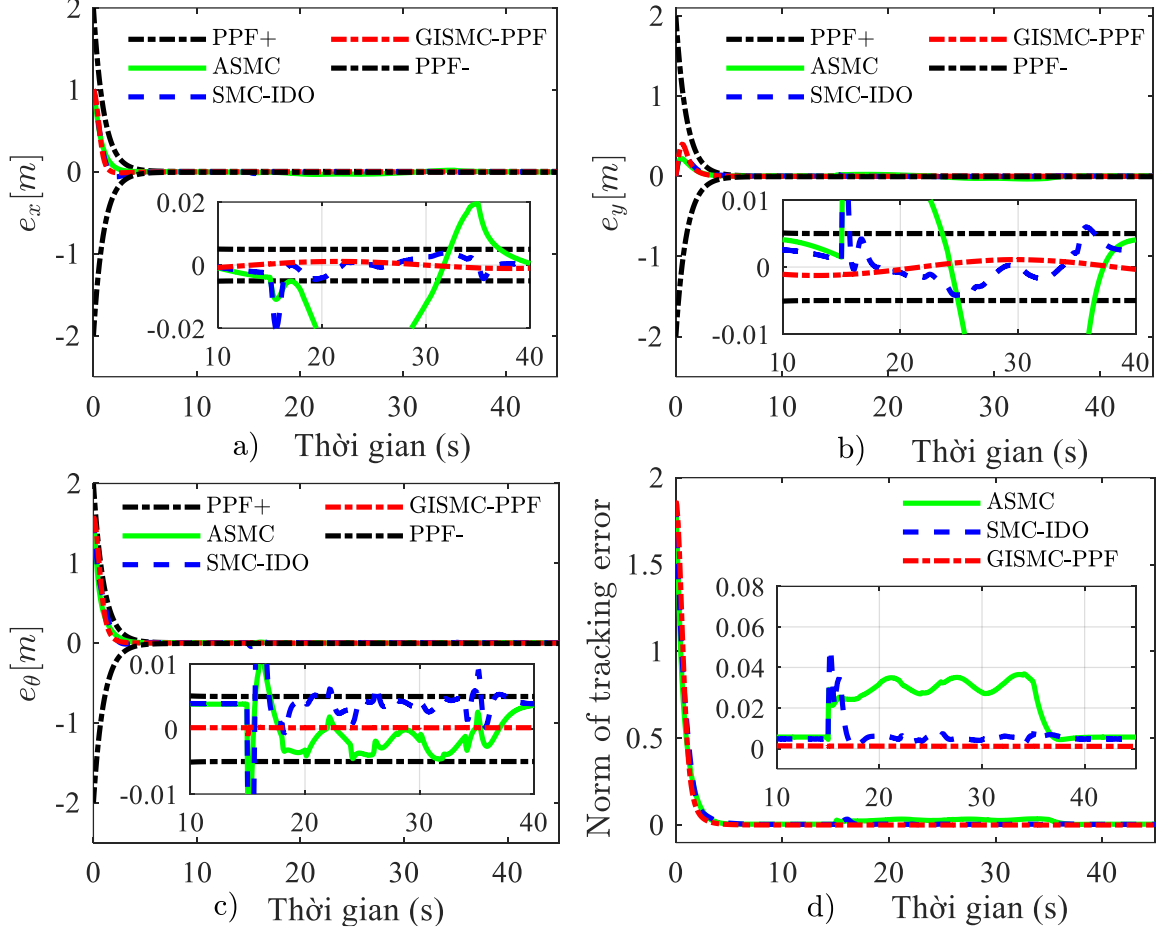
Bảng 4.2. Các tham số của bộ điều khiển ASMC, SMC-IDO, GISMC

Bộ điều khiển	Tham số
ASMC	$k_x = 0.9, k_y = 3, k_\theta = 3.2, k_{s1} = 25, k_{s2} = 10$
SMC-IDO	$k_x = 0.9, k_y = 3, k_\theta = 3.2, k_{s1} = 25, k_{s2} = 10,$ IDO: $\xi_1 = 22, \alpha_1 = 0.1$.
GISMC-PPF (Proposed)	$\kappa_0 = 8, \kappa_1 = 35, \kappa_2 = 15$ IDO: $\xi_1 = 22, \alpha_1 = 0.1$ PPF: $\rho_0 = 2; \rho_\infty = 0.005; c = 1$.

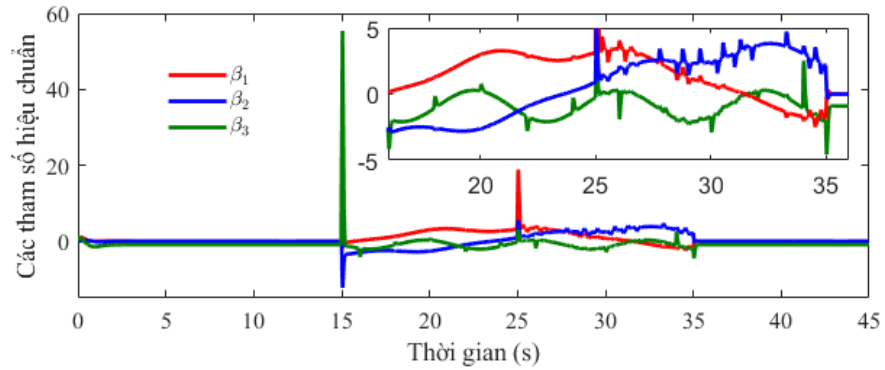
4.3.2. Kết quả và đánh giá

Mô phỏng với thời gian 45 giây được thực hiện nhằm đánh giá toàn diện tính bền vững và khả năng chịu lỗi của bộ điều khiển GISMC. Kịch bản mô phỏng bao gồm ba giai đoạn liên tiếp với mức độ bất định và lỗi tăng dần, như đã mô tả trong phần thiết lập mô phỏng.

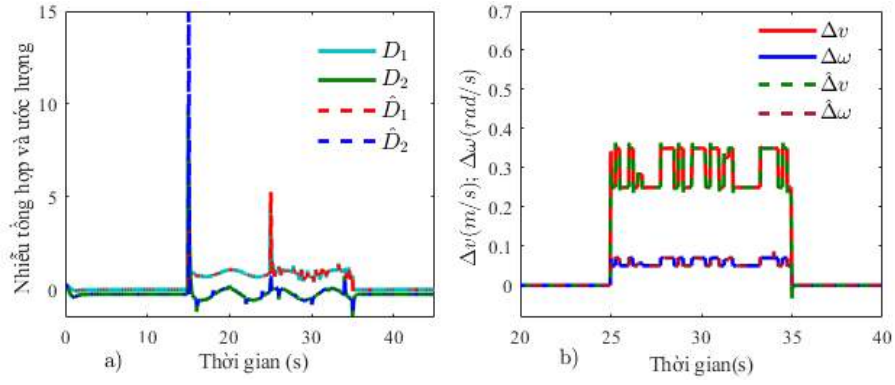
Các kết quả so sánh giữa GISMC-PPF, SMC-IDO và ASMC được minh họa trong Hình 4.3 - 4.8, thể hiện các đáp ứng theo thời gian và các giá trị ước lượng; Bảng 4.3 trình bày các chỉ số hiệu năng định lượng cho tổng sai số bám Euclid trong mặt phẳng.



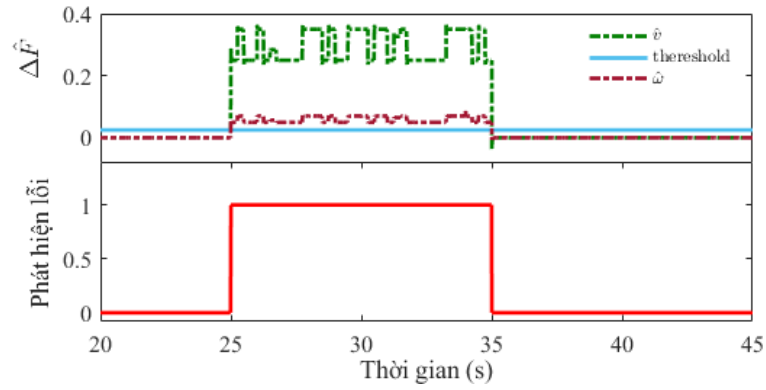
Hình 4.3. Sai lệch bám theo các trục X , Y và góc hướng θ



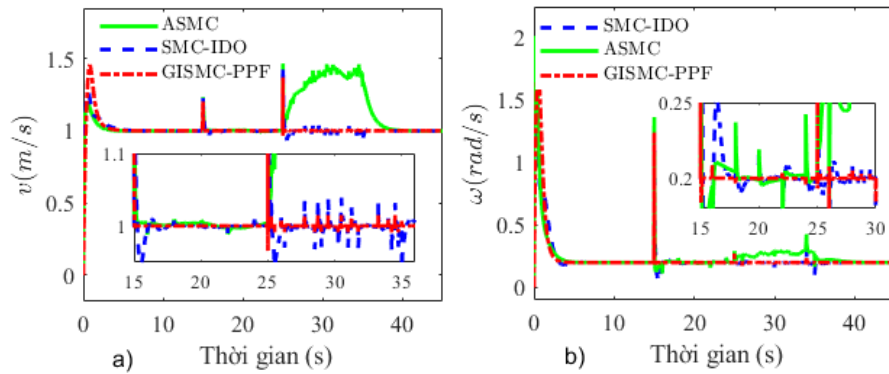
Hình. 4.4. Hệ số điều chỉnh của bộ quan sát IDO



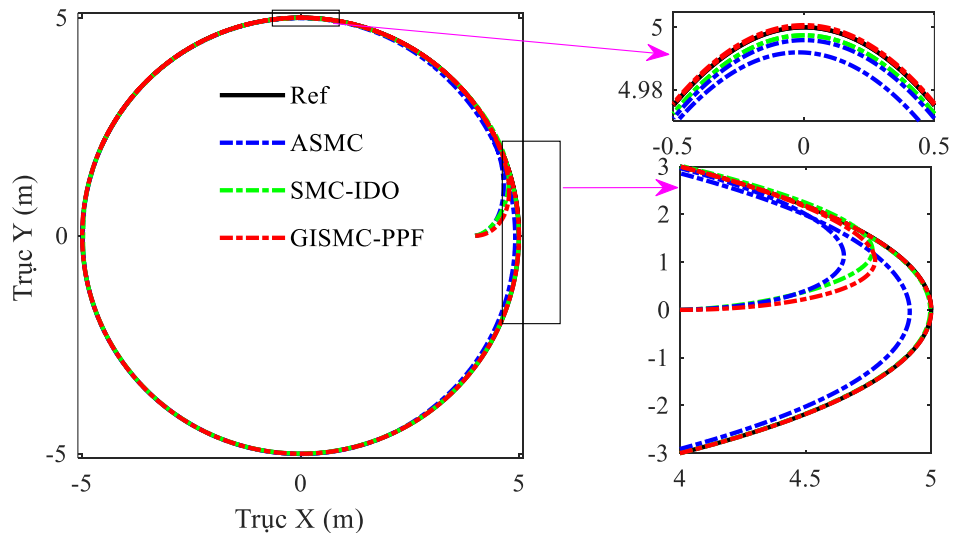
Hình 4.5. Ước lượng lỗi và tổng ảnh hưởng của nhiễu và trượt bánh.



Hình 4.6. Phát hiện lỗi



Hình 4.7. Vận tốc tịnh tiến (a) và vận tốc góc (b) của robot



Hình 4.8. Quỹ đạo bám đường đi của robot

Bảng 4.3. Các chỉ số hiệu năng cho tổng sai số bám Euclid trong mặt phẳng (x,y) của GISMC-PPF, ASMC, SMC-IDO

CHỈ SỐ	MSE	MAE	RMSE	IAE	ISE
GISMC-PPF	0.0128	0.0217	0.1133	0.9752	0.5772
ASMC	0.0433	0.1159	0.2081	5.2156	1.9479
SMC-IDO	0.0114	0.0244	0.1067	1.0986	0.5119

Hình 4.3 thể hiện diễn biến theo thời gian của độ lệch bám theo các trục x , y và hướng θ . Trong Giai đoạn I, tất cả các bộ điều khiển đều duy trì sai số xác lập nhỏ dưới mức lệch tham số 10%. Khi nhiều và trượt bánh được đưa vào trong Giai đoạn II, bộ ASMC xuất hiện các dao động đáng kể và độ lệch quá độ lớn hơn. Bộ SMC-IDO làm giảm các dao động này nhưng vẫn cho thấy các độ lệch quá độ lớn hơn so với phương pháp được đề xuất. Trong Giai đoạn III, khi lỗi cơ cấu chấp hành được đưa vào, bộ GISMC-PPF được đề xuất nhanh chóng tái ổn định và đưa sai số bám về các giá trị nhỏ, trong khi ASMC và SMC-IDO thể hiện các đáp ứng quá độ lớn hơn và kéo dài hơn. Các quỹ đạo robot trong Hình 4.8 xác nhận rằng bộ điều khiển được đề xuất luôn bám sát quỹ đạo tham chiếu nhất trong suốt tất cả các giai đoạn.

Bảng 4.3 tổng hợp các chỉ số sai số toàn cục được tính từ tín hiệu sai số Euclid trong mặt phẳng (x,y). Các quan sát chính như sau:

- MAE và IAE (sai số tuyệt đối và sai số tuyệt đối tích lũy): bộ GISMC được đề xuất đạt MAE = 0.0217 và IAE = 0.9752, là các giá trị nhỏ nhất trong số các phương pháp được khảo sát. So với ASMC, phương pháp đề xuất làm giảm IAE khoảng 81% (từ 5.2156 xuống 0.9752) và MAE khoảng 81% (từ 0.1159 xuống 0.0217). So với SMC-IDO, bộ điều khiển được đề xuất làm giảm IAE khoảng 11% và MAE khoảng 11%, cho thấy khả năng phục hồi nhanh hơn và trạng thái xác lập mượt hơn.

- RMSE: GISMC đạt giá trị RMSE 0.1133, xác nhận độ chính xác tổng thể cao hơn và ít xuất hiện các sai lệch tức thời có biên độ lớn.

- MSE và ISE (các chỉ số bình phương): SMC-IDO nhỉnh hơn một chút so với phương pháp đề xuất về MSE (0.0114 so với 0.0128) và ISE (0.5119 so với 0.5772). Điều này cho thấy SMC-IDO đôi khi đạt được sai số bình phương tức thời nhỏ hơn; tuy nhiên, các giá trị MAE và IAE lớn hơn của nó cho thấy lợi thế này không chuyển hóa thành hiệu năng tích lũy hoặc tuyệt đối tốt hơn.

- Tổng thể, tập hợp các chỉ số cho thấy bộ GISMC-PPF được đề xuất cung cấp sự đánh đổi tốt nhất giữa độ mượt ở trạng thái xác lập (MAE, IAE) và độ chính xác (RMSE) trong điều kiện đồng thời tồn tại sai lệch mô hình, trượt bánh, nhiễu và lỗi cơ cấu chấp hành.

Hình 4.4 thể hiện hệ số điều chỉnh thích nghi của bộ IDO; diễn biến của nó xác nhận khả năng của bộ quan sát trong việc tăng hệ số ước lượng khi biên độ nhiễu/lỗi tăng lên. Hình 4.5 trình bày nhiễu gộp và các tín hiệu lỗi cơ cấu chấp hành được ước lượng; IDO theo dõi chính xác dạng nhiễu và xác định đúng thời điểm cũng như biên độ của các lỗi được đưa vào. Kết quả phát hiện lỗi trong Hình 4.6 (vượt ngưỡng) cho thấy thời điểm xuất hiện lỗi trong Giai đoạn III được xác định chính xác. Những kết quả này giải thích vì sao GISMC-PPF có khả năng phục hồi nhanh hơn các ước lượng nhiễu/lỗi chính xác và kịp thời cho phép bộ điều khiển bù hiệu quả trong pha quá độ.

Hình 4.7 thể hiện vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của robot. Dưới bộ GISMC-PPF, các tín hiệu điều khiển duy trì độ mượt cao, với chuyển mạch tần số cao bị hạn chế, cho thấy cấu trúc điều khiển trượt tích phân kết hợp IDO đã giảm thiểu hiệu quả hiện tượng chattering vốn thường gặp trong SMC cổ điển. Tác động điều khiển mượt hơn góp phần trực tiếp làm giảm MAE và IAE, đồng thời duy trì vận tốc robot trong các giới hạn thực tế đã được chỉ định.

Thảo luận và đánh giá

Các kết quả định lượng và miền thời gian cho thấy bộ GISMC-PPF được đề xuất duy trì đáng tin cậy sai số bám trong biên hiệu năng định trước ($\pm\text{PPF} = \pm 0.005$ m) trong cả điều kiện danh định và có nhiễu, đồng thời khôi phục nhanh hiệu năng sau khi xuất hiện lỗi cơ cấu chấp hành. Mặc dù SMC-IDO đôi khi đạt các sai số bình phương nhỏ hơn một chút (MSE, ISE), các giá trị MAE/IAE lớn hơn và khả năng phục hồi chậm hơn khiến nó kém phù hợp trong các trường hợp yêu cầu sai lệch tích lũy nhỏ và độ mượt cao. ASMC, ngược lại, thể hiện các dao động lớn hơn đáng kể và sai số tích lũy cao hơn, cho thấy độ bền kém hơn trong các điều kiện được khảo sát.

Xét cả định lượng và định tính, GISMC-PPF được đề xuất kết hợp với IDO cho thấy hiệu năng vượt trội về tốc độ hội tụ, khả năng khử nhiễu/lỗi và độ mượt của bám quỹ đạo trong các kịch bản bất định và có lỗi thực tế. Những đặc tính này khiến phương pháp trở nên hấp dẫn cho triển khai thực tế trên các nền tảng NWMR hoạt động trong môi trường không chắc chắn và biến đổi động.

4.4. Kết luận chương 4

Chương 4 đã trình bày một chiến lược điều khiển chịu lỗi có hiệu năng cao cho NWMR, dựa trên sự kết hợp giữa điều khiển trượt toàn cục, bộ quan sát nhiễu cải tiến và ràng buộc hiệu năng bám quỹ đạo định trước. Trên cơ sở mô hình động lực học có xét đến lỗi cơ cấu chấp hành, trượt bánh xe và sự thay đổi vị trí trọng tâm,

luật điều khiển được thiết kế nhằm đảm bảo hội tụ hữu hạn thời gian của sai số bám quỹ đạo và kiểm soát chặt chẽ hành vi quá độ của hệ thống.

Các phân tích ổn định dựa trên hàm Lyapunov đã chứng minh tính ổn định và khả năng hội tụ của hệ thống điều khiển đề xuất trong điều kiện tồn tại nhiễu và bất định. Kết quả mô phỏng cho thấy chiến lược điều khiển trong chương này đạt được chất lượng bám quỹ đạo cao, tốc độ đáp ứng nhanh và khả năng duy trì hiệu năng ổn định ngay cả khi xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành và các điều kiện vận hành bất lợi.

Kết quả nghiên cứu trình bày trong Chương 4 đã được công bố trong các công trình [CT4].

[CT4]. Sy Phuong Ho, Manh Tien Ngo, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Van Chuong Le, Van Nam Dinh, Van Du Phan, "Global Sliding Mode Fault-Tolerant Control for Non-holonomic Wheeled Robots: Ensuring Prescribed Performance in the Presence of Faults and Slippage," in IEEE Access, vol. 14, pp. 18857-18867, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3660656. (SCIE-Q1)

KẾT LUẬN

Luận án tập trung nghiên cứu bài toán điều khiển chịu lỗi cho NWMR nhằm đảm bảo khả năng bám quỹ đạo chính xác và ổn định trong điều kiện tồn tại đồng thời nhiễu, bất định mô hình và lỗi cơ cấu chấp hành. Trọng tâm của luận án là xây dựng các phương pháp quan sát và điều khiển chịu lỗi theo hướng tích hợp, phù hợp với đặc thù cấu trúc của hệ robot di động. Trên cơ sở phân tích tổng quan, luận án chỉ ra rằng nhiều nghiên cứu hiện nay chủ yếu xử lý lỗi cơ cấu chấp hành dưới dạng nhiễu tổng hợp, trong khi việc quan sát và khai thác thông tin lỗi một cách tường minh còn hạn chế. Đồng thời, các kiến trúc điều khiển–quan sát phân tầng cho NWMR chưa được phát triển một cách hệ thống.

Từ đó, luận án đã xây dựng mô hình động học và động lực học của NWMR có xét đến lỗi, nhiễu và bất định, làm cơ sở cho thiết kế bộ quan sát và điều khiển. Trên nền tảng này, luận án phát triển các bộ quan sát cho phép ước lượng trực tiếp ảnh hưởng của lỗi cơ cấu chấp hành, thay vì gộp vào nhiễu tổng hợp, qua đó nâng cao khả năng phát hiện và xử lý lỗi. Dựa trên kết quả quan sát, luận án đề xuất kiến trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng theo hướng phân tầng, trong đó các bài toán động học và động lực học được xử lý tách biệt nhưng có liên kết chặt chẽ. Kiến trúc này cho phép tích hợp hiệu quả các bộ quan sát và điều khiển, đảm bảo ổn định hệ thống và chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện bất định.

Bên cạnh đó, luận án xây dựng một chiến lược điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt, kết hợp với bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước. Phương pháp này cho phép cải thiện tốc độ hội tụ và kiểm soát hành vi quá độ của hệ, đồng thời đóng vai trò như một chuẩn tham chiếu để đánh giá các kiến trúc phân tầng. Các phương pháp đề xuất được chứng minh ổn định theo Lyapunov và kiểm chứng thông qua các kịch bản mô phỏng với nhiễu, trượt bánh và lỗi cơ cấu chấp hành. Kết quả cho thấy khả năng duy trì ổn định và nâng cao chất lượng bám quỹ đạo của hệ so với các phương pháp truyền thống.

Các kết quả của luận án được kiểm chứng chủ yếu thông qua mô phỏng số. Một số thuật toán tiêu biểu thuộc Chương 3 đã được triển khai và đánh giá bước đầu trên mô hình robot thực, qua đó cho thấy khả năng ứng dụng của các phương pháp đề xuất. Tuy nhiên, việc thực nghiệm chưa bao quát toàn bộ các thuật toán trong luận án. Khi triển khai đầy đủ trên hệ thực, cần tiếp tục xem xét ảnh hưởng của sai lệch mô hình, nhiễu đo, trễ tính toán, quá trình rời rạc hóa, bão hòa cơ cấu chấp hành, thay đổi tải trọng và điều kiện tiếp xúc bánh–mặt nền.

Những đóng góp mới của luận án:

(1) Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

(2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án:

- Mở rộng các phương pháp đề xuất cho hệ nhiều robot và các bài toán phối hợp.
- Tiếp tục triển khai và đánh giá đồng bộ toàn bộ các thuật toán đề xuất trên robot thực và nền tảng AGV, có xét đến nhiễu đo, trễ tính toán, giới hạn cơ cấu chấp hành, thay đổi tải trọng và điều kiện mặt nền.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

[CT1]. **H. S. Phuong**, Ngo Manh Tien*, Ngo Duy Tan, Mai The Anh, Duong Dinh Tu, “*Proposal of a Fault-tolerant controller for wheeled mobile robots with faulty actuators*,” 2023 12th International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hanoi, Vietnam, pp. 507-512, 2023. DOI: 10.1109/ICCAIS59597.2023.10382286. **(SCOPUS)**

[CT2]. **Sy Phuong Ho**, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Thanh Tri Nguyen, Van Vy Phan, “*Fault-Tolerant Trajectory Tracking Control for Non-holonomic Mobile Robots Using HOICD-SMC*”, Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1804. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-15839-0_26. **(SCOPUS-Q4)**

[CT3]. **Sy Phuong Ho**, Dinh Tu Duong, Van Chuong Le, Van Vy Phan, Hung Cuong Ta, Thanh Tri Nguyen, "Fault-Tolerant Control for Mobile Robots: Integrating Low-Pass Filters for Improved Actuator Fault Compensation," *2025 3rd International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences*, Tumakuru, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSSES64899.2025.11009298. **(SCOPUS-Q4)**

[CT4]. **Sy Phuong Ho**, Manh Tien Ngo, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Van Chuong Le, Van Nam Dinh, Van Du Phan, "Global Sliding Mode Fault-Tolerant Control for Non-holonomic Wheeled Robots: Ensuring Prescribed Performance in the Presence of Faults and Slippage," in *IEEE Access*, vol. 14, pp. 18857-18867, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3660656. **(SCIE-Q1)**

[CT5]. **Sy Phuong Ho**, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Van Du Phan, Kim Duyen Ha Thi, Thanh Tri Nguyen, Minh Dang Dau, Thu Uyen Le Thi, “*Fault-Tolerant Trajectory Tracking of Mobile Robots via Model-Free Intelligent PID and Fault Observer*”, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics (BEEI), vol. 15, no. 1, February 2026, pp. 184~197, DOI: 10.11591/eei.v15i1.9884 **(SCOPUS-Q3)**

[CT6]. **Sy Phuong Ho**, Manh Tien Ngo, Duy Tan Ngo, Dinh Tu Duong, Kim Duyen Ha Thi*, Thanh Tri Nguyen, Ngoc Phuoc Le, Viet Anh Dang, “*Dual-Observer based Framework for Fault-Tolerant Trajectory Tracking of Non-holonomic Wheeled Mobile Robots*”, J Robot Control (JRC), vol. 6, no. 6, pp. 2871–2882, Dec. 2025. DOI: 10.18196/jrc.v6i6.28586 **(SCOPUS-Q2)**

[CT7]. Van Du Phan, The Anh Mai, **Sy Phuong Ho**, Thai Son Dang, Van Chuong Le, Van Nam Dinh. “*Development of an Adaptive Integral Terminal Sliding Mode Tracking Control for a Wheeled Mobile Robot With Time Delay Estimation*”. *Int. J.*

Control Autom. Syst. 23, 2399–2410 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12555-024-0747-x>. (SCIE-Q2)

[CT8]. Sy **Phuong Ho**, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Van Du Phan, Dinh Tu Duong, Van Vy Phan, “*Hybrid Fault-Tolerant Adaptive Controller for Robust Trajectory Tracking of Mobile Robots*”, Transactions of the Institute of Measurement and Control, pp. 1-11, 2026. Doi: 10.1177/01423312261449864 (SCIE-Q2)

[CT9]. Sy **Phuong Ho**, Manh Tien Ngo*, Duy Tan Ngo, Van Du Phan, Thai Son Dang, Dinh Tu Duong, Van Nam Dinh, Van Manh Tran, “*Robust Fault-tolerant Control based on the integration of controllers for Non-holonomic Mobile Robots with Disturbance Observers*”, International Journal of Control, Automation, and Systems. <https://doi.org/10.1007/s12555-026-00093-8> (SCIE-Q2)

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Leena and K. K. Saju, "Modelling and trajectory tracking of wheeled mobile robots," *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 538–545, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.094.
- [2] Giuseppe Fragapane, René de Koster, Fabio Sgarbossa, Jan Ola Strandhagen, Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda, *European Journal of Operational Research*, Volume 294, Issue 2, 2021, Pages 405-426, DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.019.
- [3] Gao X, Yan L, Gerada C. Modeling and Analysis in Trajectory Tracking Control for Wheeled Mobile Robots with Wheel Skidding and Slipping: Disturbance Rejection Perspective. *Actuators*. 2021; 10(9):222. <https://doi.org/10.3390/act10090222>
- [4] M. L. Visinsky, J. R. Cavallaro, and I. D. Walker, "Robotic fault detection and fault tolerance: A survey," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 46, no. 2, pp. 139-158, 1994. DOI: 10.1016/0951-8320(94)90067-1
- [5] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3757-3767, Jun. 2015, <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2417501>
- [6] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, 2006. DOI: 10.1007/3-540-30368-5
- [7] G. Tao, S. Chen, X. Tang, and S. M. Joshi, *Adaptive Control of Systems With Actuator Failures*. London, U.K.: Springer-Verlag, 2004, doi: 10.1007/978-1-4471-3758-0
- [8] X.-Z. Jin, Y.-X. Zhao, H. Wang, Z. Zhao, and X.-P. Dong, "Adaptive fault-tolerant control of mobile robots with actuator faults and unknown parameters," *IET Control Theory & Applications*, vol. 13, no. 11, pp. 1665-1672, 2019.
- [9] P. Yazdjerdi and N. Meskin, "Design and real-time implementation of actuator fault-tolerant control for differential-drive mobile robots based on multiple-model approach," *Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering*, vol. 232, no. 6, pp. 652-661, 2018. DOI: 10.1177/0959651818779849.
- [10] Z. Shen, Y. Ma, and Y. Song, "Robust adaptive fault-tolerant control of mobile robots with varying center of mass," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2419-2428, 2018.
- [11] D. L. Tran et al., "Advanced trajectory tracking control for wheeled mobile robots under actuator faults and slippage," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 14, no. 3, pp. 1746–1757, 2025, doi: 10.11591/eei.v14i3.9047.
- [12] Y. Huang, J. Wu, and M. Li, "Real-Time Fault-Tolerant Trajectory Tracking for Mobile Robots Using Fuzzy Logic and Backstepping Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1345-1354, 2023.
- [13] L. Yan, B. Ma, Y. Jia and Y. Jia, "Observer-Based Trajectory Tracking Control of Non-holonomic Wheeled Mobile Robots," in *IEEE Transactions on Control Systems*

- Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 1114-1121, May 2024, doi: 10.1109/TCST.2024.3351073.
- [14] D. Luenberger, "Observers for multivariable systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 11, no. 2, pp. 190-197, April 1966, doi: 10.1109/TAC.1966.1098323.
 - [15] R. E. Kalman, *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering, vol. 82 (Series D), pp. 35–45, 1960.
 - [16] H. K. Khalil, "Extended high-gain observers as disturbance estimators," *SICE J. Control, Meas., Syst. Integr.*, vol. 10, no. 3, pp. 125–134, May 2017.
 - [17] C. Edwards and S. K. Spurgeon, "Sliding mode observers for fault detection and isolation", *Automatica*, 2000. DOI: 10.1016/S0005-1098(99)00177-6
 - [18] M. Hou and P. C. Muller, "Design of observers for linear systems with unknown inputs," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 6, pp. 871-875, June 1992, doi: 10.1109/9.256351
 - [19] Wen-Hua Chen, "Disturbance observer based control for nonlinear systems," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 4, pp. 706-710, Dec. 2004, doi: 10.1109/TMECH.2004.839034.
 - [20] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a non-holonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics," *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 149-163, 1997.
 - [21] J.-M. Yang and J.-H. Kim, "Sliding mode control for trajectory tracking of non-holonomic wheeled mobile robots," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 3, pp. 578–587, Jun. 1999.
 - [22] L. Yang and S. Pan, "A sliding mode control method for trajectory tracking control of wheeled mobile robot," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1074, p. 012059, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1074/1/012059
 - [23] Y. Koubaa, M. Boukattaya, and T. Damak, "Adaptive sliding mode control for trajectory tracking of non-holonomic mobile robot with uncertain kinematics and dynamics," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 32, no. 11, pp. 1013–1029, 2018, doi: 10.1080/08839514.2018.1519100.
 - [24] H. Xie, J. Zheng, Z. Sun, and H. Wang, "Finite-time tracking control for non-holonomic wheeled mobile robot using adaptive fast nonsingular terminal sliding mode," *Nonlinear Dyn.*, vol. 110, pp. 1437–1453, 2022, doi: 10.1007/s11071-022-07682-2.
 - [25] M. Yue, J. Gao, T. Ma, and J. Chen, "Finite-time sliding mode control for trajectory tracking of WMRs with wheel-soil friction disturbance adaptability," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 31, no. 1, pp. 80–101, 2017, doi: 10.1080/08839514.2017.1298173.
 - [26] M. Cui, L. Zhou, Y. Cheng and W. Liu, "Design of Observer-Controller Combination for Non-holonomic Mobile Robots," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 47874-47884, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3551081.

- [27] R. Miranda-Colorado, "Observer-based finite-time control for trajectory tracking of wheeled mobile robots with kinematic disturbances," *ISA Trans.*, vol. 148, pp. 64–77, 2024, doi: 10.1016/j.isatra.2024.03.031.
- [28] M. Cui, "Observer-based adaptive tracking control of wheeled mobile robots with unknown slipping parameters," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 167235–167246, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2955887.
- [29] B. Qin, H. Yan, X. Hu, Y. Tian, and S. X. Yang, "Enhanced extended state observer-based prescribed time tracking control of wheeled mobile robot with slipping and skidding," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 34, pp. 7314–7331, 2024, doi: 10.1002/rnc.7347.
- [30] Z. Li and J. Zhai, "Super-twisting sliding mode trajectory tracking adaptive control of wheeled mobile robots with disturbance observer," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 32, no. 17, pp. 9869–9881, 2022, doi: 10.1002/rnc.6343.
- [31] M. A. Kamel, X. Yu and Y. Zhang, "Fault-Tolerant Cooperative Control Design of Multiple Wheeled Mobile Robots," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 756–764, Mar 2018, doi: 10.1109/TCST.2017.2679066.
- [32] C. Hua, J. Li, and S. Li, "Finite-time FTC for nonlinear systems with actuator failures via disturbance observer," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.: Syst.*, vol. 50, no. 9, pp. 3327–3337, Sep. 2020.
- [33] D. Qian, Y. Zhang, and B. Jiang, "Fixed-time FTC for nonlinear systems with actuator faults and mismatched disturbances," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.: Syst.*, vol. 51, no. 2, pp. 1173–1184, Feb. 2021.
- [34] Nguyen V.-C., Tran X.-T., Kang H.-J., "A novel high-speed third-order sliding mode observer for fault-tolerant control problem of robot manipulators," *Actuators*, 11(9), 259, 2022. DOI: 10.3390/act11090259.
- [35] X. Zhang, Y. Xie, L. Jiang, G. Li, J. Meng and Y. Huang, "Fault-Tolerant Dynamic Control of a Four-Wheel Redundantly-Actuated Mobile Robot," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 157909–157921, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2949746.
- [36] H. Yang, M. Guo, Y. Xia, and Z. Sun, "Dual closed-loop tracking control for wheeled mobile robots via active disturbance rejection control and model predictive control," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 30, no. 1, pp. 80–99, 2020.
- [37] R. Isermann, "Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications," *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2004.12.002
- [38] G. Oriolo, A. De Luca, and M. Vendittelli, "WMR control via dynamic feedback linearization: Design, implementation, and experimental validation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 835–852, 2002.
- [39] J. Fu, F. Tian, T. Chai, Y. Jing, Z. Li and C. -Y. Su, "Motion Tracking Control Design for a Class of Non-holonomic Mobile Robot Systems," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 50, no. 6, pp. 2150–2156, June 2020, doi: 10.1109/TSMC.2018.2804948.

- [40] N. K. Goswami and P. K. Padhy, "Sliding mode controller design for trajectory tracking of a non-holonomic mobile robot with disturbance," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 72, pp. 307–323, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.09.021>
- [41] B. Moudoud, H. Aissaoui, and M. Diany, "Adaptive integral-type terminal sliding mode control: Application to trajectory tracking for mobile robot," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 37, no. 3, pp. 603–616, 2023, doi: 10.1002/acs.3540.
- [42] M. Labbadi, S. Boubaker, M. Djemai, S. K. Mekni, and A. Bekrar, "Fixed-time fractional-order global sliding mode control for non-holonomic mobile robot systems under external disturbances," *Fractal Fract.*, vol. 6, no. 4, p. 177, 2022, doi: 10.3390/fractalfract6040177.
- [43] M. Asif, M. J. Khan, and N. Cai, "Adaptive sliding mode dynamic controller with integrator in the loop for non-holonomic wheeled mobile robot trajectory tracking," *Int. J. Control*, vol. 87, no. 5, pp. 964–975, 2014, doi: 10.1080/00207179.2013.862597.
- [44] T. Das and I. N. Kar, "Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 501–510, 2006.
- [45] Roger Miranda-Colorado, Nohe R. Cazarez-Castro, Observer-based fuzzy trajectory-tracking controller for wheeled mobile robots with kinematic disturbances, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 133, Part C, 2024, 108279, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108279>.
- [46] X. Wu and P. Zhang, "Robust Control for Non-holonomic Mobile Robots Using Fuzzy Logic and Adaptive Techniques," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 10, no. 1, pp. 150-159, 2023.
- [47] J. Peng, H. Xiao, and G. Lai, "Nonlinear disturbance observer incorporated model predictive strategy for wheeled mobile robot's trajectory tracking control," *Int. J. Control Autom. Syst.*, vol. 22, no. 7, pp. 2251–2262, 2024, doi: 10.1007/s12555-023-0207-z.
- [48] X. Gao, R. Gao, P. Liang, Q. Zhang, R. Deng and W. Zhu, "A Hybrid Tracking Control Strategy for Non-holonomic Wheeled Mobile Robot Incorporating Deep Reinforcement Learning Approach," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 15592-15602, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053396.
- [49] Dongliang Wang, Yong Gao, Wu Wei, Qiuda Yu, Yuhai Wei, Wenji Li, Zhun Fan, Sliding mode observer-based model predictive tracking control for Mecanum-wheeled mobile robot, *ISA Transactions*, Vol 151, 2024, pp 51-61, doi: 10.1016/j.isatra.2024.05.050.
- [50] D. Huang, J. Zhai, W. Ai, and S. Fei, "Disturbance observer-based robust control for trajectory tracking of wheeled mobile robots," *Neurocomputing*, vol. 198, pp. 74–79, 2016, doi: 10.1016/j.neucom.2015.11.099.
- [51] B. Moudoud, H. Aissaoui, and M. Diany, "Extended state observer-based finite-time adaptive sliding mode control for wheeled mobile robot," *J. Control Decis.*, vol. 9, no. 4, pp. 465–476, 2022, doi: 10.1080/23307706.2021.2024458.

- [52] X. Chen, Y. Liu, and Z. Zhang, "Fault-Tolerant Control for Mobile Robots Based on Dynamic Surface and Backstepping Approaches," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 879-889, 2022.
- [53] X. Fang, H. Fan, W. Wang, L. Liu, B. Wang, and Z. Cheng, "Adaptive finite-time fault-tolerant control of uncertain systems with input saturation," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.: Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 165–177, Jan. 2023, doi: 10.1109/tsmc.2022.3170573
- [54] Van M., Kang H.J., et al., "Fault tolerant control for robot manipulators using neural network and second-order sliding mode observer," *ICIC (Springer)*, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-39479-9_62.
- [55] Nga Thi-Thuy Vu, Loc Xuan Ong, Nam Hai Trinh, Sen Thi Huong Pham, "Robust adaptive controller for wheel mobile robot with disturbances and wheel slips," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i1.pp336-346
- [56] B. D. O. Anderson & J. B. Moore, *Optimal Filtering*, Prentice Hall, 1979
- [57] F. Zhu and F. Cen, "Full-order observer-based actuator fault detection and reduced-order observer-based fault reconstruction for a class of uncertain nonlinear systems", *Journal of Process Control*, vol. 20, pp. 1141–1149, 2010. DOI: 10.1016/j.jprocont.2010.06.021
- [58] N. Sarrafan and K. Shojaei, "High-gain observer-based neural adaptive feedback linearizing control of a team of wheeled mobile robots," *Robotica*, vol. 38, no. 1, pp. 69–87, 2020, doi: 10.1017/S026357471900047X.
- [59] N. P. Nguyen and S. K. Hong, "Sliding Mode Thau Observer for Actuator Fault Diagnosis of Quadcopter UAVs", *Applied Sciences*, vol. 8, no. 10, p. 1893, 2018. DOI: 10.3390/app8101893
- [60] J. Zhai and Z. Song, "Adaptive sliding mode trajectory tracking control for wheeled mobile robots," *Int. J. Control*, vol. 91, no. 6, pp. 1374–1386, 2018, doi: 10.1080/00207179.2018.1436194.
- [61] H. Wu, S. Wang, H. Li, Y. Xie, S. Zheng, and S. Q. Xie, "Adaptive fault-tolerant control of wheeled mobile robots with multiple actuator faults and saturation," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 4156–4163, Apr. 2025, doi: 10.1109/LRA.2025.3548505.
- [62] A. Kaldmae and U. Kotta, "A brief tutorial overview of disturbance observers for nonlinear systems: application to flatness-based control," *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. 69, no. 1, pp. 57-73, 2020. DOI: 10.3176/proc.2020.1.07.
- [63] S. E. Talole, J. P. Kolhe, and S. B. Phadke, "Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1411-1419, 2010.
- [64] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [65] H. Razmjooei, G. Palli, and M. Nazari, "Disturbance observer-based nonlinear feedback control for position tracking of electro-hydraulic systems in a finite time," *European Journal of Control*, vol. 67, 2022.

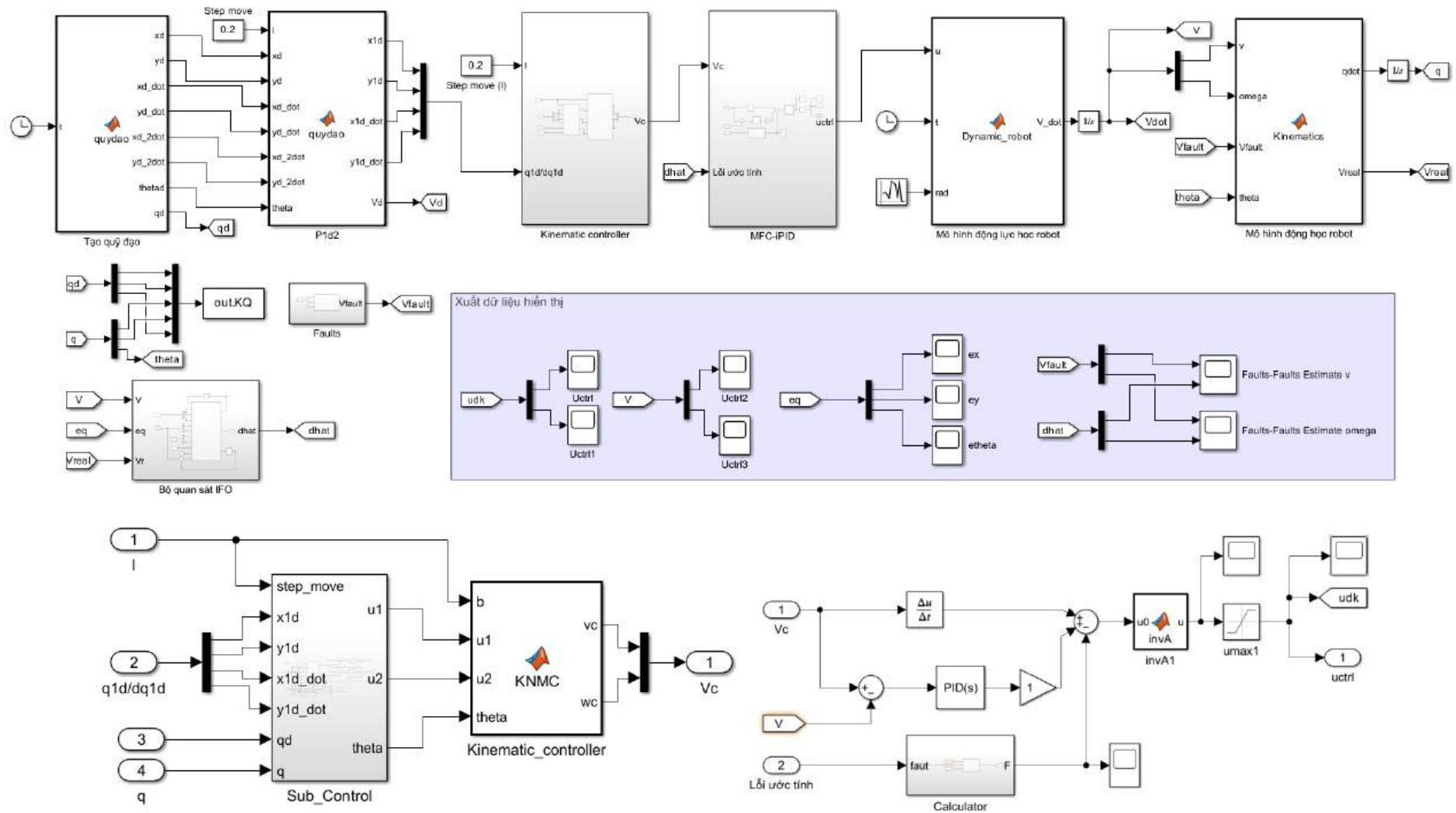
- [66] Phan, V.D.; Vo, C.P.; Dao, H.V.; Ahn, K.K. Actuator Fault-Tolerant Control for an Electro-Hydraulic Actuator Using Time Delay Estimation and Feedback Linearization. *IEEE Access* 2021, 9, 107111–107123.
- [67] V. Du Phan, P. Ho Sy, and K. K. Ahn, "Disturbance Attenuation-Based Global Integral Sliding Mode Control of an Electro-Hydraulic System With Prescribed Performance," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 105108-105118, 2024.
- [68] S. Chang, Y. Wang, Z. Zuo, and H. Yang, "Fixed-time formation control for wheeled mobile robots with prescribed performance," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 844–851, 2021.
- [69] J.-X. Zhang and G.-H. Yang, "Fuzzy adaptive output feedback control of uncertain nonlinear systems with prescribed performance," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 48, no. 5, pp. 1342–1354, May 2018, doi: 10.1109/TCYB.2017.2692767.
- [70] Kadu, C. B., Khandekar, A. A., & Patil, C. Y. "Design of Sliding Mode Controller With Proportional Integral Sliding Surface for Robust Regulation and Tracking of Process Control Systems". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 140(9), 091004, 2018, doi:10.1115/1.4039468
- [71] R. E. Precup, R. C. Roman, and A. Safaei, "Data-Driven Model-Free Controllers," *Data-Driven Model-Free Controllers*, pp. 1–403, 2021, doi: 10.1201/9781003143444
- [72] M. Fliess and C. Join, "Model-free control," *International Journal of Control*, vol. 86, no. 12, pp. 2228–2252, Dec. 2013, doi:10.1080/00207179.2013.810345
- [73] M. Qin, B. Guo, J. Liu, Q. Xiao, R. Guo and S. -y. Dian, "Fault-Tolerant control of trajectory tracking for mobile robot," 2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), Dalian, China, pp. 269-273, 2021, doi: 10.1109/CACRE52464.2021.9501392.
- [74] V.-C. Nguyen, M. T. Vu, and S. H. Kim, "A finite-time non-singular fast terminal sliding mode control of wheeled mobile robots with prescribed performance," *IET Control Theory & Applications*, vol. 19, no. 1, Art. no. e70013, 2025, doi: 10.1049/cth2.70013.
- [75] T. Nguyen and H. L. Le, "Neural network-based adaptive tracking control for a non-holonomic wheeled mobile robot subject to unknown wheel slips," *Tạp chí Tin học và Điều khiển*, vol. 33, no. 1, pp. 1–17, 2017.
- [76] Nguyễn Văn Tính, "Nghiên cứu phát triển một số thuật toán điều khiển rô bốt di động có tính đến ảnh hưởng của trượt bánh xe," *Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 2018.
- [77] Van Tinh Nguyen and Linh Le, "Neural network-based adaptive tracking control for a non-holonomic wheeled mobile robot with unknown wheel slips, model uncertainties, and unknown bounded disturbances," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 26, no. 1, pp. 378–392, 2018.
- [78] Chung Le, Kiem Nguyen Tien, Linh Nguyen, Tinh Nguyen, Tung Hoang, "Designing a robust adaptive tracking backstepping controller considering actuator saturation for a wheeled mobile robot to compensate unknown slippage," *Journal of Computer Science and Cybernetics*, vol. 36, no. 2, pp. 187–204, 2020, doi: 10.15625/1813-9663/36/2/14807.

- [79] T. T. Thuong, V. T. Ha, V. Q. Vinh, and N. T. Hien, “Adaptive neural sliding mode control for wheeled mobile robots with slip compensation,” *Journal of Robotics and Control*, vol. 7, no. 1, pp. 3472–3480, Mar. 2026, doi: 10.18196/jrc.v7i1.26373.
- [80] Viet Quoc Ha, Sen Huong Thi Pham, and Nga Thi Thuy Vu, “Adaptive fuzzy type-2 controller for wheeled mobile robot with disturbances and wheelslips,” *Journal of Robotics*, vol. 2021, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1155/2021/6946210.
- [81] Vu Thi To Linh, “Research and design controller for mobile robot on the basis of sliding mode control method,” *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 8, pp. 95–102, 2022.
- [82] Tran Thi Thuy Trang, Pham Thanh Tung, “Proportional integral derivative sliding mode control for an omni-directional mobile robot,” *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 8, pp. 123–130, 2022.
- [83] T. H. Nguyen, T. H. Vo, Q. L. Vo, and H. H. Bui, “Design and development of traction tracking control for mobile robots based on neural networks subject to uncertainty parameters and disturbances,” *HUIH Journal*, vol. 2024, Art. no. 286, 2024, doi: 10.57001/huih5804.2024.286.
- [84] Doãn Văn Hóa, Lê Thị Hoàn, “Điều khiển thích nghi bền vững cho robot di động vi sai hai bánh có mô hình bất định, nhiễu ngoài và trượt bánh xe trên cơ sở bộ điều khiển trượt và mạng nơ ron,” *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 230, no. 10, 2025, doi: 10.34238/tnu-jst.12361.
- [85] Zhang, J.-X., & Chai, T. (2025). “Fault-tolerant control of wheeled mobile robots with prescribed trajectory tracking performance.” *Journal of Automation and Intelligence*, 4(2), 73–81. DOI: 10.1016/j.jai.2024.12.002.
- [86] Nguyen, V.-C., & Kim, S. H. (2025). “A novel fixed-time prescribed performance sliding mode control for uncertain wheeled mobile robots.” *Scientific Reports*, 15, 5340. DOI: 10.1038/s41598-025-89126-6.
- [87] Nguyen, V.-C., Vu, M. T., & Kim, S. H. (2025). “A Finite-Time Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control of Wheeled Mobile Robots With Prescribed Performance.” *IET Control Theory & Applications*, 19(1), e70013. DOI: 10.1049/cth2.70013.
- [88] “Prescribed-time Sliding Mode Control of Perturbed Wheeled Mobile Robots.” *IFAC-PapersOnLine*, 59(17), 203–208, 2025. DOI: 10.1016/j.ifacol.2025.10.164.
- [89] “Prescribed-Time Extended State Observer-Based Model Predictive Control for Wheeled Mobile Robots.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 73(2), 3187–3198, 2026. DOI: 10.1109/TIE.2025.3605489.
- [90] Zhou, Z., Ge, J., & Yu, H. (2026). “Hierarchical Observation Strategy-Based Prescribed Performance Sliding Mode Control for Wheeled Mobile Robots with Sideslip.” *International Journal of Control, Automation and Systems*. DOI: 10.1007/s12555-026-00075-w.
- [91] Youibot Robotics, “Industrial Logistics Solutions,” [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://en.youibot.com/solutions-category/industrial-logistics.html>. Truy cập ngày 30/09/2026.

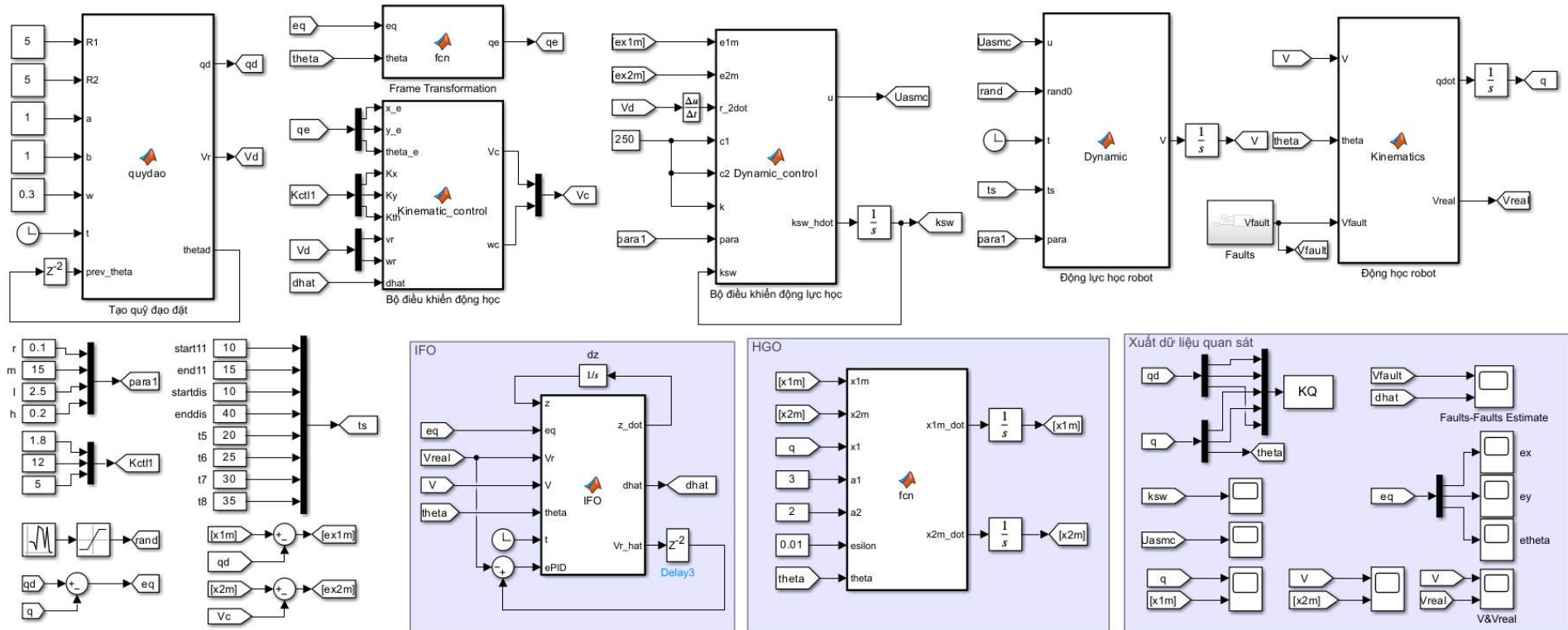
PHỤ LỤC

- PL1.** Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển MFC-iPID-FO
- PL2.** Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển DOA-SMC
- PL3.** Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển FB-IFO-SMC-ESO
- PL4.** Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển GISMC-PPF
- PL5.** Bản vẽ thiết kế mô hình robot
- PL6.** Mô hình robot sử dụng trong thực nghiệm
- PL7.** Kết quả thực nghiệm
- PL8.** Chương trình thực nghiệm cho bộ điều khiển FB-IFO-SMC-ESO

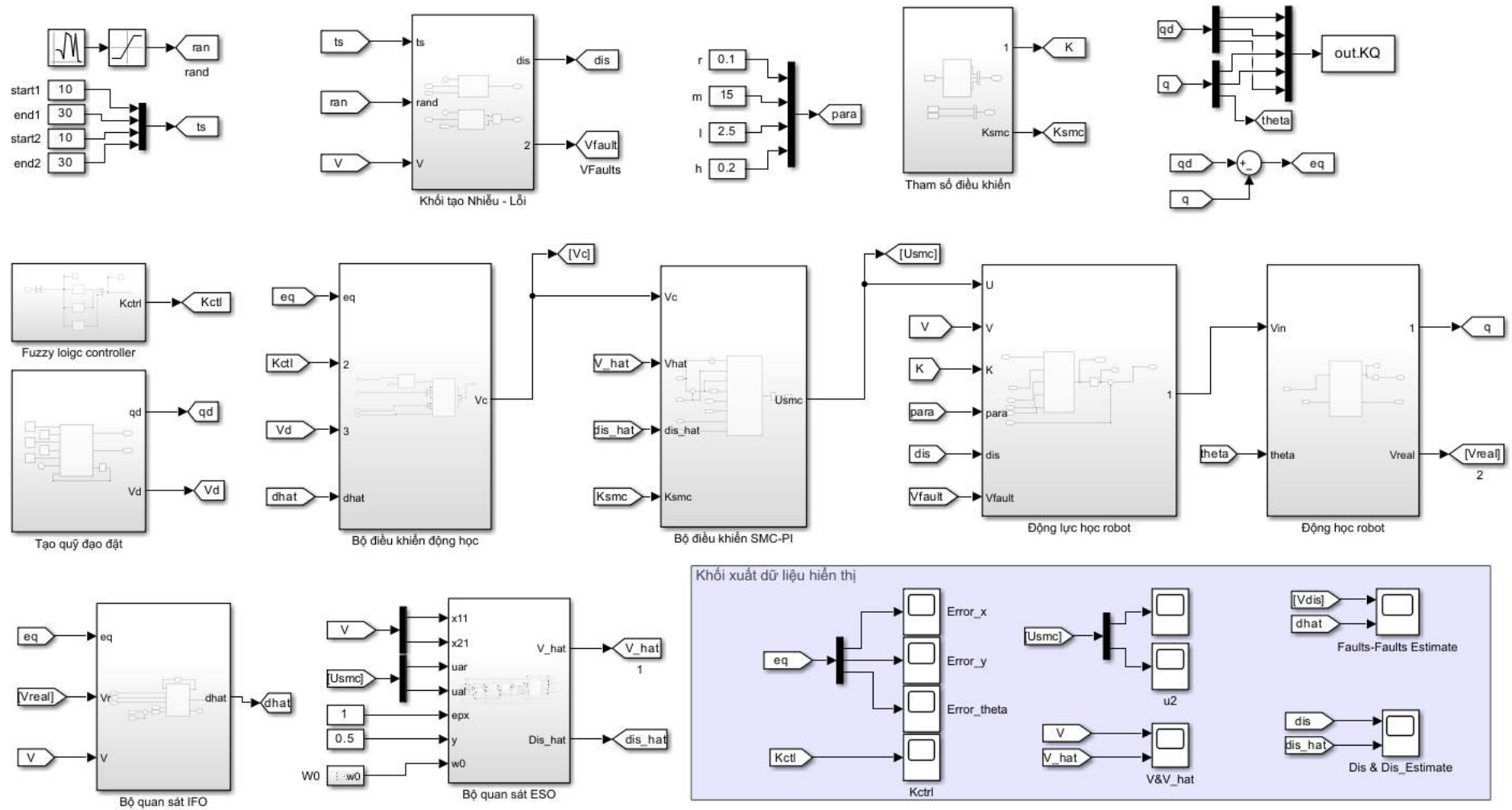
PL1. Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển MFC-iPID-FO



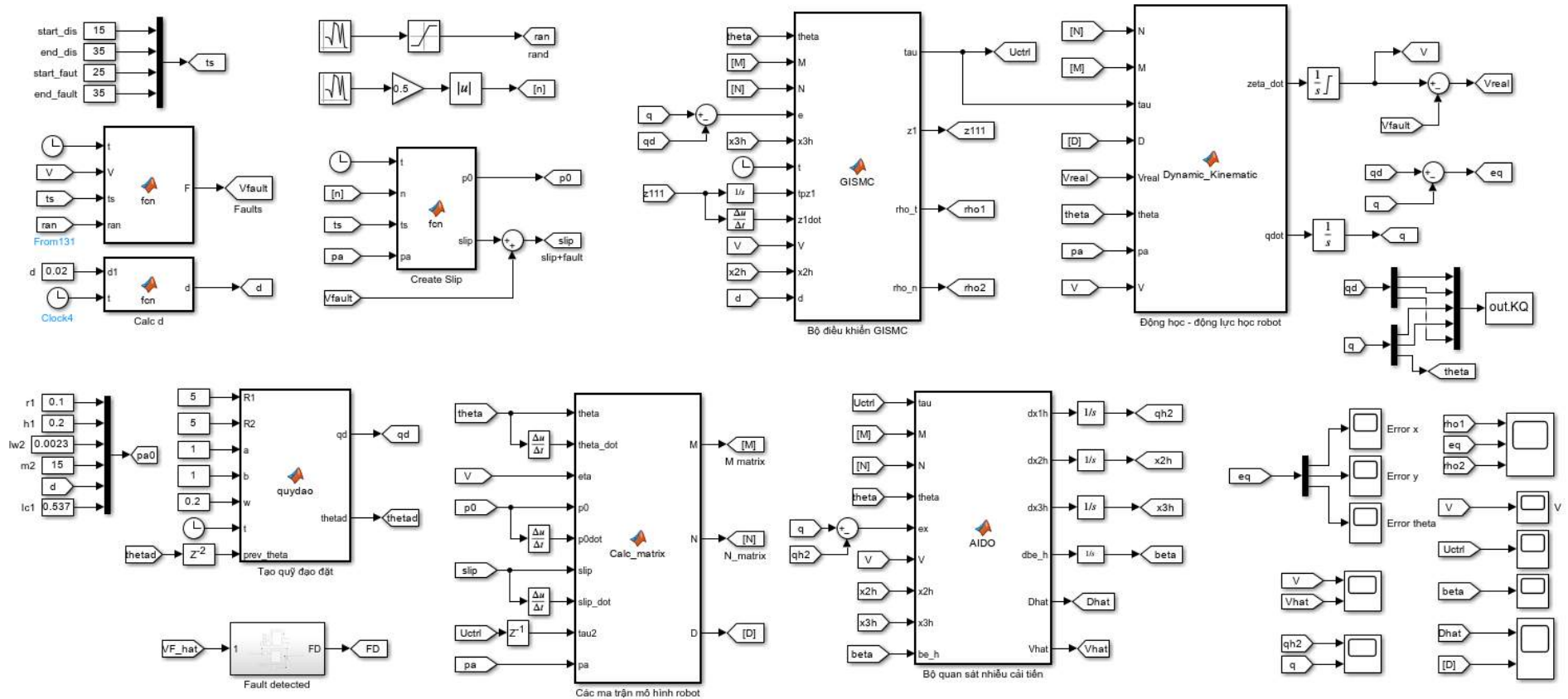
PL2. Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển DOA-SMC



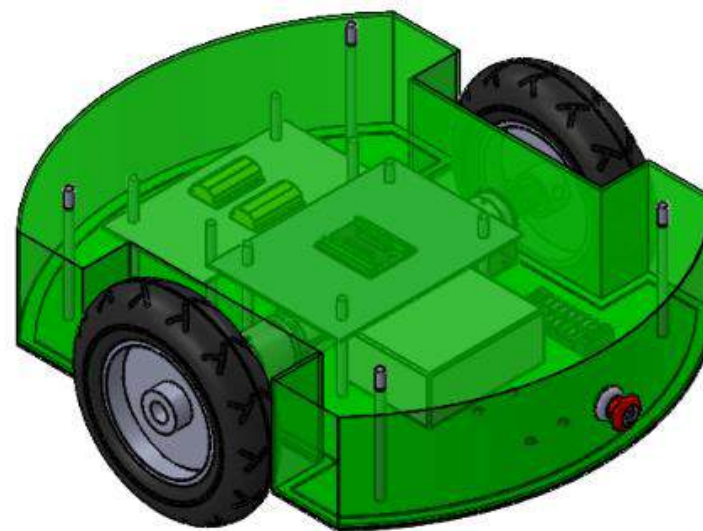
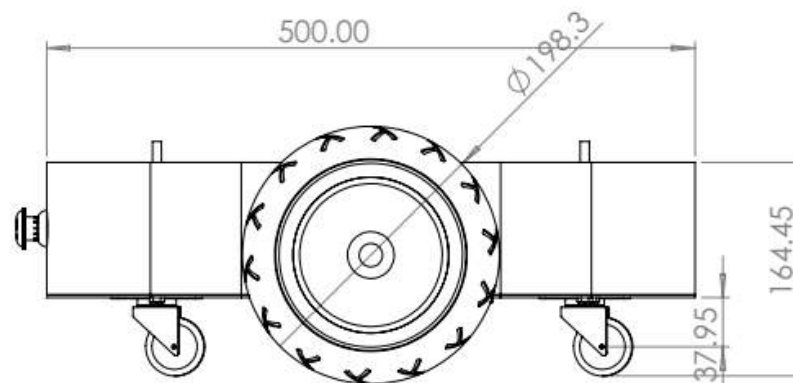
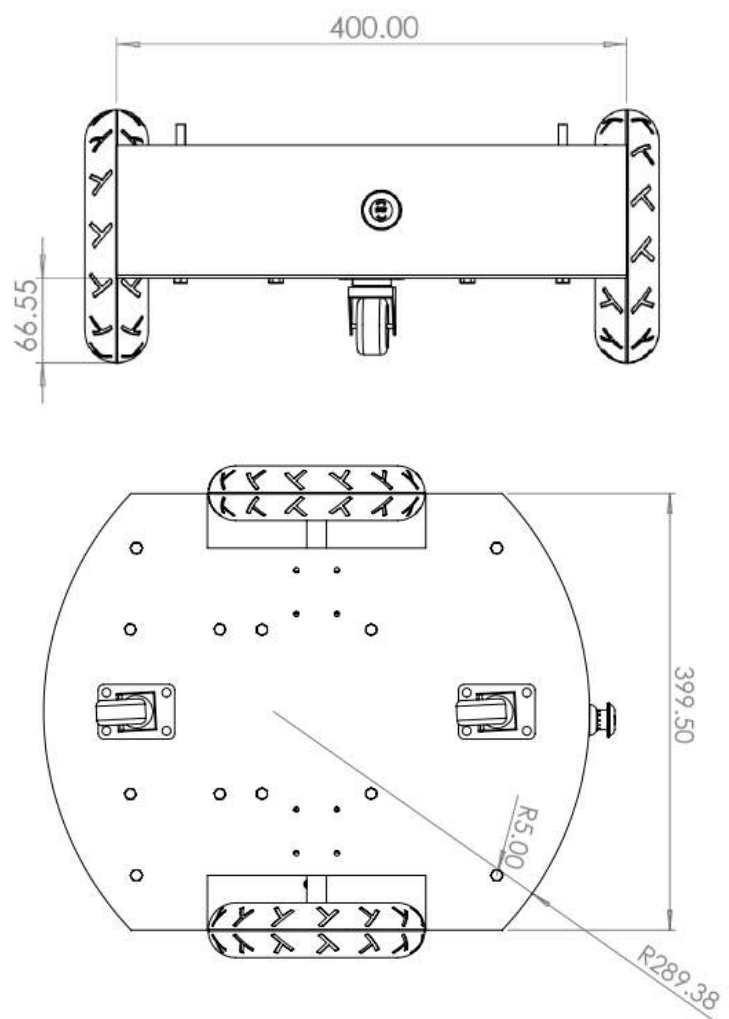
PL3. Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển FB-IFO-SMC-ESO



PL4. Sơ đồ Matlab/Simulink mô phỏng bộ điều khiển GISMC-PPF



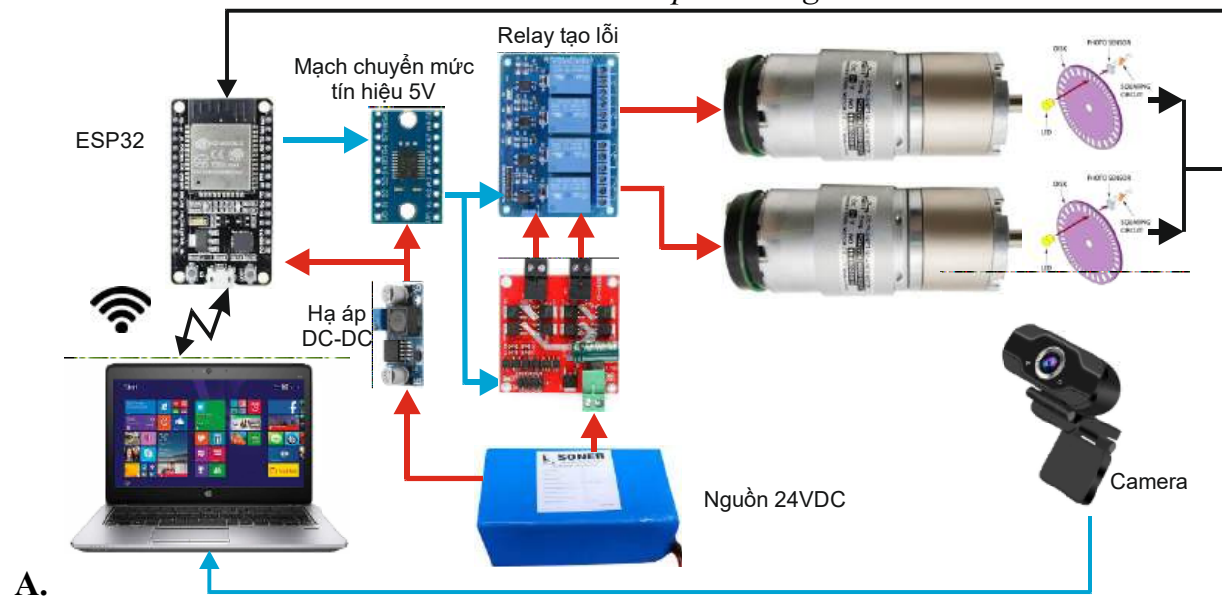
PL5. Bản vẽ thiết kế mô hình robot



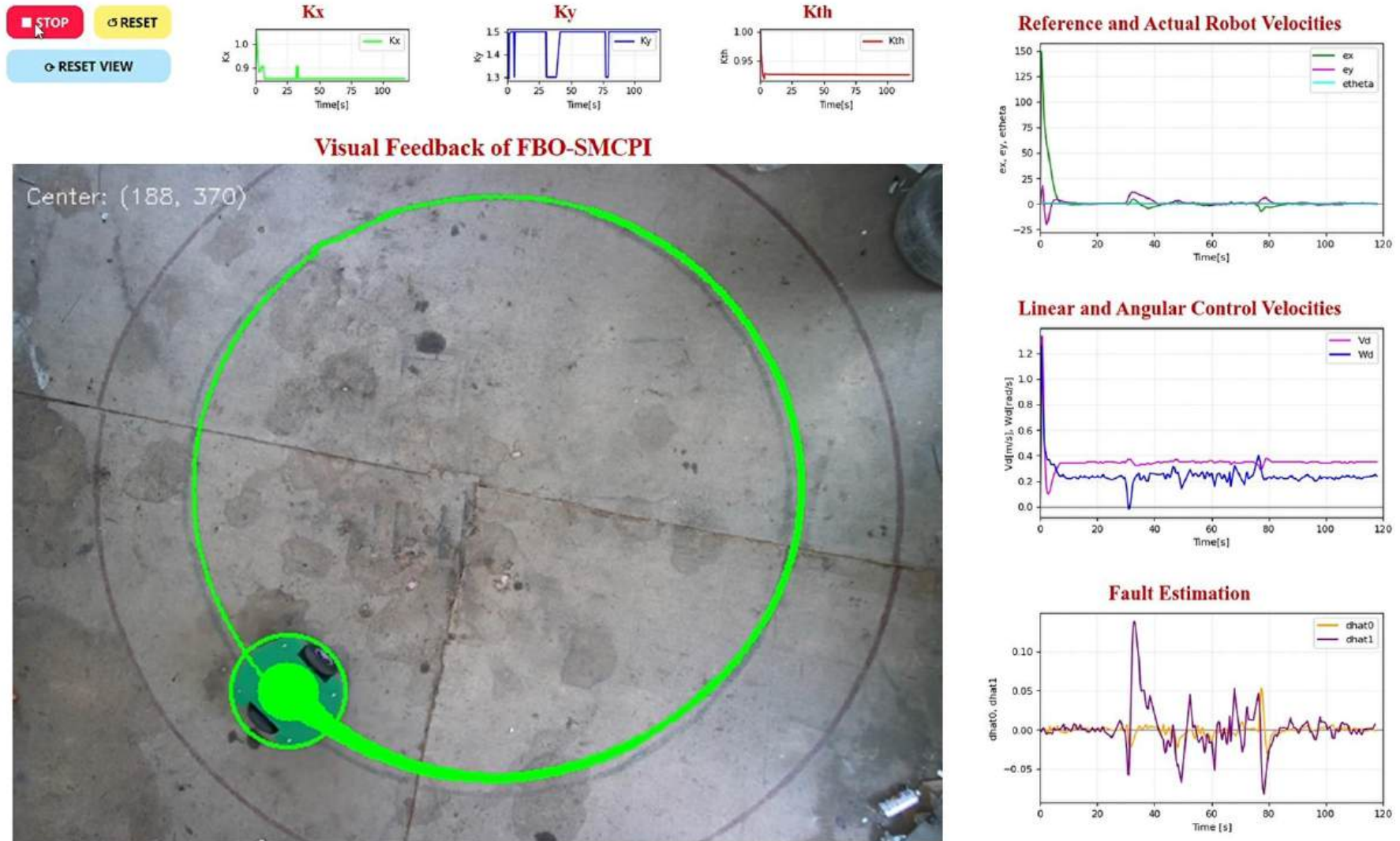
PL6. Mô hình robot sử dụng trong thực nghiệm



Sơ đồ đấu nối phân cứng



PL7. Kết quả thực nghiệm (https://drive.google.com/drive/folders/170p8Q15WPTCzcv8AkhSULsq1xrh9o-_D)



PL8. Chương trình thực nghiệm cho bộ điều khiển FB-IFO_SMC_ESO

A. Sơ đồ cấu trúc chương trình:

FTC_FB-IFO_SMC-ESO

- FTC_FBO_SMCESO.ino *Setup() và loop()*
- Config.h *Cấu hình chân, WiFi, thông số robot, bật/tắt fuzzy/SMC/IFO/ESO*
- RobotGlobals.h *Khai báo các biến toàn cục*
- FuzzyGain.h *Bộ chỉnh định Fuzzy kx,ky,kth*
- SMCPIControl.h *SMC-PI nhận Vc, Wc; xuất V_cmd, W_cmd; có hỗ trợ bù Dv_hat, Dw_hat từ ESO*
- ExtendedStateObserver.h *ESO ước lượng v_hat, w_hat, Dv_hat, Dw_hat theo mô hình động lực học*
- IFOObserver.h *Bộ quan sát lỗi cải tiến*
- TrajectoryControl.h *Tạo quỹ đạo, tính sai số, gọi FLC, IFO, ESO, đổi sang tốc độ bánh*
- MotorPID.h *PID tốc độ trên động cơ*
- EncoderOdometry.h *Encoder và odometry*
- WebHandlers.h *Các API web /start, /stop ..*
- RelayControl.h *Khởi tạo lỗi*
- Utils.h *Hàm tiện ích/ reset*
- Huongdan.txt

// Chương trình chính - FTC_FBO_SMCESO.ino

```
#include <WiFi.h>      Serial.println("WiFi connection failed. Continue
#include <WebServer.h>      without WiFi.");
}
}

#include "Config.h"
#include "Utils.h"
#include "EncoderOdometry.h"
#include "MotorPID.h"
#include "RelayControl.h"
#include "WebHandlers.h"
#include "TrajectoryControl.h"

#include "RobotGlobals.h"
#include "IFOObserver.h"
#include "FuzzyGain.h"
#include "SMCPIControl.h"
#include "ExtendedStateObserver.h"

inline void setupWiFi() {
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);

    unsigned long wifiStart = millis();
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED &&
millis() - wifiStart < 10000UL) {
        Serial.println("Connecting to WiFi...");
        delay(500);
    }

    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        Serial.println("WiFi connected");
        Serial.print("IP address: ");
        Serial.println(WiFi.localIP());
    } else {
```

```
        Serial.println("WiFi connection failed. Continue
        without WiFi.");
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    setupRelay();
    setupMotorPins();
    setupEncoderAndTimer();

    FuzzyGain_Reset(fuzzyGainState);
    SMCPI_Reset(smcp);
    ESO_Reset(eso);
    ESO_ClearOutput(eso_out);
    IFO_Reset(ifo);

    // Initialize output/debug variables consistently
    before web server starts.
    fuzzyGain.Kx = KX_NOM;
    fuzzyGain.Ky = KY_NOM;
    fuzzyGain.Kth = KTH_NOM;
    fuzzyGain.e_pos = 0.0f;
    fuzzyGain.e_th = 0.0f;
    fuzzyGain.dxe = 0.0f;
    fuzzyGain.dye = 0.0f;
    fuzzyGain.dthetae = 0.0f;
    fuzzyGain.yKx = 0.0f;
    fuzzyGain.yKy = 0.0f;
    fuzzyGain.yKth = 0.0f;
```

```

    setupWiFi();
    setupWebServer();
    Serial.println("HTTP server started");

    t_prev1 = millis();
    t_prev2 = millis();
    prevTime = millis();
    count_prev = count;
}

void loop() {
    unsigned long currentTime = millis();

    server.handleClient();
    tinhtoado();

    if (globalVLL == 0.0f)
        ledcWrite(PWM_CHANNEL_M2, 0);
    if (globalVRR == 0.0f)
        ledcWrite(PWM_CHANNEL_M1, 0);

    if (count > count_prev) {
        // 1. Tầng điều khiển quỹ đạo + Fuzzy + IFO + SMC-PI
        quydao();

        // Khai báo biến toàn cục – RobotGlobals.h
        #ifndef ROBOT_GLOBALS_H
        #define ROBOT_GLOBALS_H

        #include <Arduino.h>
        #include <WiFi.h>
        #include <WebServer.h>
        #include "Config.h"
        #include "IFOObserver.h"
        #include "FuzzyGain.h"
        #include "SMCPIControl.h"
        #include "ExtendedStateObserver.h"

        WebServer server(80);

        // Timer
        hw_timer_t *timer1 = NULL;

        // Relay state
        bool relayState = HIGH;
        unsigned long relayTimer = 0;
        int relayStep = 0;

        // Robot parameters and measured states
        float l = WHEEL_BASE;
        float vthuc = 0.0f;
        float wthuc = 0.0f;

        volatile unsigned long count = 0;
        unsigned long count_prev = 0;

        // Encoder/motor states
        float Theta_now1 = 0.0f;
        float Theta_prev1 = 0.0f;
        float Theta_now2 = 0.0f;
        float Theta_prev2 = 0.0f;

        // 2. Tầng PID tốc độ hai bánh
        t_now1 = millis();
        t_now2 = millis();

        dt1 = float(t_now1 - t_prev1);
        dt2 = float(t_now2 - t_prev2);

        PID1();
        PID2();

        // 3. Vận tốc thực sau PID motor,
        vthuc = (Vl_output + Vr_output) / 2.0f;
        wthuc = (Vr_output - Vl_output) / l;

        t_prev1 = t_now1;
        t_prev2 = t_now2;
        count_prev = count;

        updateRelaySchedule(currentTime);
    }
}

float Vl_output = 0.0f;
float Vr_output = 0.0f;
float RPM_output1 = 0.0f;
float RPM_input1 = 0.0f;
float RPM_output2 = 0.0f;
float RPM_input2 = 0.0f;

float dt1 = 0.0f;
float dt2 = 0.0f;

unsigned long t_now1 = 0;
unsigned long t_prev1 = 0;
unsigned long t_now2 = 0;
unsigned long t_prev2 = 0;

volatile long dem_motor1 = 0;
volatile long dem_motor2 = 0;
volatile long dem_motor11 = 0;
volatile long dem_motor22 = 0;

int PWMval1 = 0;
int PWMval2 = 0;

float V1 = 0.0f;
float V2 = 0.0f;

float error_now1 = 0.0f;
float error_prev1 = 0.0f;
float integ_now1 = 0.0f;
float integ_prev1 = 0.0f;

float error_now2 = 0.0f;
float error_prev2 = 0.0f;
float integ_now2 = 0.0f;

```

```

float integ_prev2 = 0.0f;

// Wheel velocity references
float globalVLL = 0.0f; // left wheel linear speed
[m/s]
float globalVRR = 0.0f; // right wheel linear speed
[m/s]

// Odometry
float v = 0.0f;
float w = 0.0f;
float x = 0.0f;
float y = 0.0f;
float toadox = 0.0f;
float toadoy = 0.0f;
float theta = 0.0f;
unsigned long prevTime = 0;

// Trajectory and tracking states
float omega = DEFAULT_OMEGA;
float R = DEFAULT_R_CM;

float xd = 0.0f;
float yd = 0.0f;
float xd_dot = 0.0f;
float yd_dot = 0.0f;
float xd_2dot = 0.0f;
float yd_2dot = 0.0f;
float x1d = 0.0f;
float y1d = 0.0f;
float wd = 0.0f;
float x1d_dot = 0.0f;
float y1d_dot = 0.0f;
float Thetad = 0.0f;
float X1 = 0.0f;
float Y1 = 0.0f;
float ex = 0.0f;
float ey = 0.0f;
float eth = 0.0f;
float xe = 0.0f;
float ye = 0.0f;
float thetai = 0.0f;

// File cấu hình - Config.h
#ifndef CONFIG_H
#define CONFIG_H

// ----- WiFi -----
const char* WIFI_SSID = "D";
const char* WIFI_PASSWORD = "20040922";

// ----- Motor pins -----
const int MOTOR1_PIN1 = 2;
const int MOTOR1_PIN2 = 4;
const int MOTOR1_EN = 5;

const int MOTOR2_PIN1 = 22;
const int MOTOR2_PIN2 = 23;
const int MOTOR2_EN = 15;

// ----- Encoder pins -----
const int ENCO_A_MOTOR1 = 32;

float Vc = 0.0f;
float Wc = 0.0f;
float V_cmd_final = 0.0f;
float W_cmd_final = 0.0f;
float xdat = 0.0f;
float ydat = 0.0f;

float t = 0.0f;
float b = B_LOOKAHEAD;

// Current gains used by tracking controller. Fuzzy
updates these.
float Kx = KX_NOM;
float Ky = KY_NOM;
float Kth = KTH_NOM;
float pi = PI_ROBOT;

float vr = 0.0f;
float wr = 0.0f;
bool check = false;

// IFO observer state
IFOSState ifo;
float dhat[2] = {0.0f, 0.0f};
float dV_obs = 0.0f;
float dW_obs = 0.0f;
float dV_obs_use = 0.0f;
float dW_obs_use = 0.0f;

// Fuzzy, SMC-PI and ESO states
FuzzyGainState fuzzyGainState;
FuzzyGainOutput fuzzyGain;
SMCPIState smcpi;
SMCPIOOutput smcpi_out;
ESOSState eso;
ESOOutput eso_out;

// Gating for observer compensation
float alpha = 0.0f;
float alpha_prev = 0.0f;

#endif

const int ENCO_B_MOTOR1 = 14;
const int ENCO_A_MOTOR2 = 13;
const int ENCO_B_MOTOR2 = 26;

// ----- PWM -----
const int PWM_FREQ = 30000;
const int PWM_CHANNEL_M1 = 0;
const int PWM_CHANNEL_M2 = 1;
const int PWM_RESOLUTION = 8;

// ----- Relay -----
const int RELAY_PIN = 18;

// ----- Robot physical parameters -----
const float WHEEL_BASE = 0.4f; // 1 [m],
khoảng cách hai bánh

```

```

const float WHEEL_DIAMETER = 0.19f;    // [m]
const float WHEEL_RADIUS = WHEEL_DIAMETER / 2.0f;
const float ENCODER_PPR = 249.6f;
const float PI_ROBOT = 3.1415926f;

// Dynamic parameters for SMC-PI monitoring / dynamic form
const float ROBOT_MASS = 15.0f;    // m [kg]
const float ROBOT_INERTIA_Z = 2.5f;    // J [kg.m^2]

// ----- Control timing -----
const float CONTROL_TS = 0.15f;
const unsigned long TIMER_PERIOD_US = 150000UL;

// ----- Look-ahead point -----
const float B_LOOKAHEAD = 0.03f;

// ----- Default circular trajectory -----
const float DEFAULT_R_CM = 150.0f;
const float DEFAULT_OMEGA = 0.23f;

// ----- Controller selection -----
#define USE_FUZZY_GAIN 1
#define USE_SMC_PI 1
#define USE_IFO_OBSERVER 1
#define USE_ESO_SMC 1 // ESO hỗ trợ SMC-PI

// ----- Nominal trajectory tracking gains -----
const float KX_NOM = 0.85f;
const float KY_NOM = 1.50f;
const float KTH_NOM = 0.90f;

// Fuzzy output limits
const float KX_MIN = 0.50f;
const float KX_MAX = 1.30f;
const float KY_MIN = 1.00f;
const float KY_MAX = 2.20f;
const float KTH_MIN = 0.50f;
const float KTH_MAX = 1.40f;

// Fuzzy rule-table scaling.
const float FUZZY_KX_SPAN = 0.35f; // Kx ≈ 0.85 ± 0.35
const float FUZZY_KY_SPAN = 0.50f; // Ky ≈ 1.50 ± 0.50
const float FUZZY_KTH_SPAN = 0.35f; // Kth ≈ 0.90 ± 0.35

const float FUZZY_XE_MAX = 0.25f; // [m]
const float FUZZY_YE_MAX = 0.25f; // [m]
const float FUZZY_THETA_MAX = 0.80f; // [rad]
const float FUZZY_DXE_MAX = 0.50f; // [m/s]

const float FUZZY_DYE_MAX = 0.50f; // [m/s]
const float FUZZY_DTHETA_MAX = 1.20f; // [rad/s]

const float FUZZY_LP_ALPHA = 0.15f;
const float FUZZY_DE_LP_ALPHA = 0.25f;

// ----- SMC-PI parameters -----
const float SMC_LAMBDA_V = 0.80f;
const float SMC_LAMBDA_W = 0.80f;

// Switching/correction gains for velocity-command mode
const float SMC_KV_CORR = 0.05f;
const float SMC_KW_CORR = 0.10f;

// Boundary layer to reduce chattering
const float SMC_PHI_V = 0.03f;
const float SMC_PHI_W = 0.05f;

// Integral anti-windup for SMC-PI
const float SMC_INT_EV_MAX = 0.50f;
const float SMC_INT_EW_MAX = 0.50f;

const float V_CMD_MAX = 0.40f; // [m/s]
const float W_CMD_MAX = 1.50f; // [rad/s]

const float F_CMD_MAX = 30.0f; // [N]
const float M_CMD_MAX = 12.0f; // [N.m]

const float ESO_START_TIME = 2.0f;

const float MOTOR_KE = 0.02f; // [V/(rad/s)]
const float MOTOR_KT = 0.02f; // [N.m/A]
const float MOTOR_GEAR_N = 19.2f; // motor speed / wheel speed after gearbox
const float MOTOR_RM = 1.0f; // [ohm]

const float ESO_H = WHEEL_BASE / 2.0f;
const float ESO_B1 = (MOTOR_KT * MOTOR_GEAR_N) / MOTOR_RM;
const float ESO_B2 = (MOTOR_KT * MOTOR_KE * MOTOR_GEAR_N) / MOTOR_RM;

const float ESO_K1 = ESO_B1 / (WHEEL_RADIUS * ROBOT_MASS);
const float ESO_K2 = -2.0f * ESO_B2 / (ROBOT_MASS * WHEEL_RADIUS * WHEEL_RADIUS);
const float ESO_K3 = ESO_H * ESO_B1 / (ROBOT_INERTIA_Z * WHEEL_RADIUS);
const float ESO_K4 = -2.0f * ESO_H * ESO_B2 / (ROBOT_INERTIA_Z * WHEEL_RADIUS * WHEEL_RADIUS);

const float ESO_RHO1 = 3.0f;
const float ESO_RHO2 = 1.5f;

const float ESO_FAL_ALPHA = 0.5f;
const float ESO_FAL_DELTA = 0.02f;

```

```

const float ESO_D_LP_ALPHA = 0.15f;
const float ESO_VHAT_MAX = 1.0f; // [m/s]
const float ESO_WHAT_MAX = 3.0f; // [rad/s]
const float ESO_DV_MAX = 2.0f; // [m/s^2]
const float ESO_DW_MAX = 5.0f; // [rad/s^2]

```

```

const float SMC_ESO_VEL_GAIN = 0.02f;
const float SMC_ESO_ANG_GAIN = 0.02f;
const float SMC_DV_ESO_MAX = 0.06f;
const float SMC_DW_ESO_MAX = 0.12f;

```

```

// ----- Motor PID gains -----
const float PID_KP = 0.02f;
const float PID_KI = 0.00015f;
const float PID_KD = 0.01f;

```

```

const float MOTOR_VMAX = 24.0f;
const float MOTOR_VMIN = 0.0f;

```

// EncoderOdometry.h

```

#ifndef ENCODER_ODOMETRY_H
#define ENCODER_ODOMETRY_H
#include <Arduino.h>
#include "RobotGlobals.h"
// ENCODER INTERRUPTS + ODOMETRY
void IRAM_ATTR dem_xung_motor1() {
    if (digitalRead(ENCO_B_MOTOR1) == HIGH)
    {
        dem_motor1++;
        dem_motor11++;
    } else {
        dem_motor1++;
        dem_motor11--;
    }
}
void IRAM_ATTR dem_xung_motor2() {
    if (digitalRead(ENCO_B_MOTOR2) == HIGH)
    {
        dem_motor2++;
        dem_motor22++;
    } else {
        dem_motor2++;
        dem_motor22--;
    }
}

```

```

void IRAM_ATTR onTimer1() {
    count++;
}

```

```

inline void setupEncoderAndTimer() {
    pinMode(ENCO_A_MOTOR1, INPUT);
    pinMode(ENCO_B_MOTOR1, INPUT);
    pinMode(ENCO_A_MOTOR2, INPUT);
    pinMode(ENCO_B_MOTOR2, INPUT);
}

```

```

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCO_A_MOTOR1), dem_xung_motor1, RISING);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCO_A_MOTOR2), dem_xung_motor2, RISING);

```

```

// ----- IFO observer -----
const float IFO_START_TIME = 0.0f; // bật observer sau 0 s

```

```

const float DHAT0_MAX = 1.0f;
const float DHAT1_MAX = 1.0f;
const float DV_OBS_MAX = 0.15f;
const float DW_OBS_MAX = 0.25f;

```

```

const float KOBS_V = 1.0f;
const float KOBS_W = 0.4f;

```

```

// Gating by position error
const float OBS_E_MIN = 0.02f;
const float OBS_E_MAX = 0.10f;
const float OBS_ALPHA_RATE = 0.03f;

```

```

#endif

```

```

timer1 = timerBegin(0, 80, true);
timerAttachInterrupt(timer1, &onTimer1, true);
timerAlarmWrite(timer1, TIMER_PERIOD_US, true);
timerAlarmEnable(timer1);
}

```

```

inline void tinhtoado() {
    unsigned long currentTime = millis();
    float deltaTime = (currentTime - prevTime) / 1000.0f;
    if (deltaTime <= 0.0f) deltaTime = CONTROL_TS;
}

```

```

long cR = 0;
long cL = 0;

```

// Copy encoder pulses safely because these variables are updated in ISR.

```

noInterrupts();
cR = dem_motor11;
cL = dem_motor22;
dem_motor11 = 0;
dem_motor22 = 0;
interrupts();

```

```

float dSR = (cR / ENCODER_PPR) * PI_ROBOT * WHEEL_DIAMETER;
float dSL = (cL / ENCODER_PPR) * PI_ROBOT * WHEEL_DIAMETER;

```

```

float dS = (dSR + dSL) / 2.0f;
float dTh = (dSR - dSL) / 1;

```

```

theta = theta + dTh;
theta = normalizeAngle(theta);

```

```

x = x + dS * cos(theta - dTh / 2.0f);
y = y + dS * sin(theta - dTh / 2.0f);

```

```

v = dS / deltaTime;
w = dTh / deltaTime;

toadox = x * 100.0f;
toadoy = y * 100.0f;

//ESO
#ifndef EXTENDED_STATE_OBSERVER_H
#define EXTENDED_STATE_OBSERVER_H

#include <Arduino.h>
#include "Config.h"

struct ESOSState {
    float v_hat;
    float w_hat;

    // Filtered disturbance estimates used by SMC-PI
    float Dv_hat;
    float Dw_hat;

    // Raw integrated disturbance estimates
    float Dv_raw;
    float Dw_raw;

    bool initialized;
};

struct ESOPut {
    float e_v;
    float e_w;

    float fal_v;
    float fal_w;

    float v_hat_dot;
    float w_hat_dot;
    float Dv_hat_dot;
    float Dw_hat_dot;

    float Dv_hat;
    float Dw_hat;
};

inline void ESO_Reset(ESOSState &s) {
    s.v_hat = 0.0f;
    s.w_hat = 0.0f;
    s.Dv_hat = 0.0f;
    s.Dw_hat = 0.0f;
    s.Dv_raw = 0.0f;
    s.Dw_raw = 0.0f;
    s.initialized = false;
}

inline void ESO_ClearOutput(ESOPut &out) {
    out.e_v = 0.0f;
    out.e_w = 0.0f;
    out.fal_v = 0.0f;
    out.fal_w = 0.0f;
    out.v_hat_dot = 0.0f;
    out.w_hat_dot = 0.0f;
    out.Dv_hat_dot = 0.0f;
}

prevTime = currentTime;
}

#endif

out.Dw_hat_dot = 0.0f;
out.Dv_hat = 0.0f;
out.Dw_hat = 0.0f;
}

inline float ESO_sign(float x) {
    if (x > 0.0f) return 1.0f;
    if (x < 0.0f) return -1.0f;
    return 0.0f;
}

// Standard ADRC nonlinear fal(e, alpha, delta)
inline float ESO_fal(float e) {
    float ae = fabs(e);

    if (ae <= ESO_FAL_DELTA) {
        return e / pow(ESO_FAL_DELTA, 1.0f - ESO_FAL_ALPHA);
    }

    return pow(ae, ESO_FAL_ALPHA) * ESO_sign(e);
}

inline void ESO_Update(
    ESOSState &s,
    ESOPut &out,
    float v_meas,
    float w_meas,
    float u1,
    float u2,
    float Ts
) {
    if (Ts <= 0.0f) return;

    if (!s.initialized) {
        s.v_hat = v_meas;
        s.w_hat = w_meas;
        s.Dv_hat = 0.0f;
        s.Dw_hat = 0.0f;
        s.Dv_raw = 0.0f;
        s.Dw_raw = 0.0f;
        s.initialized = true;
    }

    // State estimation errors: ehat_v = vhat - v,
    ehat_w = what - w
    out.e_v = s.v_hat - v_meas;
    out.e_w = s.w_hat - w_meas;

    out.fal_v = ESO_fal(out.e_v);
    out.fal_w = ESO_fal(out.e_w);

    out.v_hat_dot = ESO_K1 * u1 + ESO_K2 *
v_meas + s.Dv_raw - ESO_RHO1 * out.fal_v;

```

```

out.Dv_hat_dot = -ESO_RHO2 * out.fal_v;

out.w_hat_dot = ESO_K3 * u2 + ESO_K4 *
w_meas + s.Dw_raw - ESO_RHO1 * out.fal_w;
out.Dw_hat_dot = -ESO_RHO2 * out.fal_w;

// Euler integration
s.v_hat += out.v_hat_dot * Ts;
s.w_hat += out.w_hat_dot * Ts;
s.Dv_raw += out.Dv_hat_dot * Ts;
s.Dw_raw += out.Dw_hat_dot * Ts;

// Safety clamps
s.v_hat = constrain(s.v_hat, -
ESO_VHAT_MAX, ESO_VHAT_MAX);
s.w_hat = constrain(s.w_hat, -
ESO_WHAT_MAX, ESO_WHAT_MAX);

//Fuzzy logic control
#ifndef FUZZY_GAIN_H
#define FUZZY_GAIN_H
#include <Arduino.h>
#include "Config.h"

struct FuzzyGainState {
    float Kx;
    float Ky;
    float Kth;

    float xe_prev;
    float ye_prev;
    float thetai_prev;

    float dx_e_f;
    float dy_e_f;
    float dthetae_f;

    bool initialized;
};

struct FuzzyGainOutput {
    float Kx;
    float Ky;

    static const float FUZZY_SINGLETON[9] = {
        -1.00f, -0.75f, -0.50f, -0.25f, 0.0f, 0.25f, 0.50f, 0.75f, 1.00f
    };

    static const float FUZZY_CENTER[9] = {
        -1.00f, -0.75f, -0.50f, -0.25f, 0.0f, 0.25f, 0.50f, 0.75f, 1.00f
    };

    static const uint8_t RULE_KX[9][9] = {
        {FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PL}, // de=NL
        {FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PL}, // de=NB
        {FZ_PS, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PL}, // de=NM
        {FZ_PS, FZ_PS, FZ_PS, FZ_PS, FZ_PS, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PB}, // de=NS
        {FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS, FZ_PM, FZ_PM, FZ_PB}, // de=Z
        {FZ_NS, FZ_NS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS, FZ_PS, FZ_PS, FZ_PS}, // de=PS
        {FZ_NM, FZ_NM, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS, FZ_PS}, // de=PM
        {FZ_NL, FZ_NB, FZ_NM, FZ_NS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS, FZ_PS}, // de=PB
        {FZ_NL, FZ_NB, FZ_NM, FZ_NS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS, FZ_PS} // de=PL
    };

```

```

};

static const uint8_t RULE_KY[9][9] = {
    {FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NB, FZ_NL}, // de=NL
    {FZ_PB, FZ_PM, FZ_PM, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NB, FZ_NL}, // de=NB
    {FZ_PB, FZ_PM, FZ_PM, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NM, FZ_NL}, // de=NM
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NB}, // de=NS
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NB}, // de=Z
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM}, // de=PS
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_Z, FZ_PS}, // de=PM
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS}, // de=PB
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS} // de=PL
};

static const uint8_t RULE_KTH[9][9] = {
    {FZ_PB, FZ_PM, FZ_PM, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NB, FZ_NL}, // de=NL
    {FZ_PB, FZ_PM, FZ_PM, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NB, FZ_NL}, // de=NB
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM, FZ_NB}, // de=NM
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM}, // de=NS
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_NS, FZ_NM}, // de=Z
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_Z, FZ_PS}, // de=PS
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PM, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_NS, FZ_Z, FZ_PS}, // de=PM
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS}, // de=PB
    {FZ_PL, FZ_PB, FZ_PB, FZ_PS, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_Z, FZ_PS} // de=PL
};

inline float fuzzyNormalize(float x, float xmax) {
    if (xmax <= 1e-6f) return 0.0f;
    return constrain(x / xmax, -1.0f, 1.0f);
}

inline void fuzzyMembership9(float xNorm, float mu[9]) {
    xNorm = constrain(xNorm, -1.0f, 1.0f);

    for (int i = 0; i < 9; i++) {
        mu[i] = 0.0f;
    }

    // Hai đầu là shoulder để luôn phủ đủ miền [-1,1].
    if (xNorm <= -1.0f) {
        mu[FZ_NL] = 1.0f;
        return;
    }
    if (xNorm >= 1.0f) {
        mu[FZ_PL] = 1.0f;
        return;
    }

    const float width = 0.25f;
    for (int i = 0; i < 9; i++) {
        float d = fabs(xNorm - FUZZY_CENTER[i]);
        if (d < width) {
            mu[i] = 1.0f - d / width;
        }
    }
}

inline float fuzzyInferTable(float eNorm, float deNorm, const uint8_t ruleTable[9][9]) {
    float muE[9];
    float muDE[9];

    fuzzyMembership9(eNorm, muE);
    fuzzyMembership9(deNorm, muDE);

    float num = 0.0f;
    float den = 0.0f;

    for (int i = 0; i < 9; i++) {
        for (int j = 0; j < 9; j++) {
            float w = muDE[i] * muE[j];
            if (w > 0.0f) {
                uint8_t label = ruleTable[i][j];
                num += w * FUZZY_SINGLETON[label];
                den += w;
            }
        }
    }

    if (den < 1e-6f) return 0.0f;
    return constrain(num / den, -1.0f, 1.0f);
}

inline float lowPass(float yPrev, float xNow, float alpha) {
    alpha = constrain(alpha, 0.0f, 1.0f);
    return (1.0f - alpha) * yPrev + alpha * xNow;
}

inline void FuzzyGain_Reset(FuzzyGainState &s) {
    s.Kx = KX_NOM;
    s.Ky = KY_NOM;
    s.Kth = KTH_NOM;

    s.xe_prev = 0.0f;
    s.ye_prev = 0.0f;
}

```

```

s.thetae_prev = 0.0f;

s.dxe_f = 0.0f;
s.dye_f = 0.0f;
s.dthetae_f = 0.0f;

s.initialized = false;
}

inline void FuzzyGain_Update(
    FuzzyGainState &s,
    FuzzyGainOutput &out,
    float xe,
    float ye,
    float thetae,
    float Ts
) {
    if (Ts <= 1e-6f) Ts = CONTROL_TS;

    float dxe = 0.0f;
    float dye = 0.0f;
    float dthetae = 0.0f;

    if (!s.initialized) {
        s.xe_prev = xe;
        s.ye_prev = ye;
        s.thetae_prev = thetae;
        s.initialized = true;
    } else {
        dxe = (xe - s.xe_prev) / Ts;
        dye = (ye - s.ye_prev) / Ts;
        dthetae = (thetae - s.thetae_prev) / Ts;
    }

    s.xe_prev = xe;
    s.ye_prev = ye;
    s.thetae_prev = thetae;

    // Lọc đạo hàm để giảm nhảy với nhiễu
    // encoder/odometry.
    s.dxe_f = lowPass(s.dxe_f, dxe, FUZZY_DE_LP_ALPHA);
    s.dye_f = lowPass(s.dye_f, dye, FUZZY_DE_LP_ALPHA);
    s.dthetae_f = lowPass(s.dthetae_f, dthetae, FUZZY_DE_LP_ALPHA);

    out.e_pos = sqrt(xe * xe + ye * ye);
    out.e_th = fabs(thetae);
    out.dxe = s.dxe_f;

    out.dye = s.dye_f;
    out.dthetae = s.dthetae_f;

    float xeN = fuzzyNormalize(xe, FUZZY_XE_MAX);
    float dxeN = fuzzyNormalize(s.dxe_f, FUZZY_DXE_MAX);
    float yeN = fuzzyNormalize(ye, FUZZY_YE_MAX);
    float dyeN = fuzzyNormalize(s.dye_f, FUZZY_DYE_MAX);
    float thetaeN = fuzzyNormalize(thetae, FUZZY_THETAE_MAX);
    float dthetaeN = fuzzyNormalize(s.dthetae_f, FUZZY_DTHETA_MAX);

    // Suy luận theo bảng luật.
    out.yKx = fuzzyInferTable(xeN, dxeN, RULE_KX);
    out.yKy = fuzzyInferTable(yeN, dyeN, RULE_KY);
    out.yKth = fuzzyInferTable(thetaeN, dthetaeN, RULE_KTH);

    float Kx_raw = constrain(KX_NOM + FUZZY_KX_SPAN * out.yKx, KX_MIN, KX_MAX);
    float Ky_raw = constrain(KY_NOM + FUZZY_KY_SPAN * out.yKy, KY_MIN, KY_MAX);
    float Kth_raw = constrain(KTH_NOM + FUZZY_KTH_SPAN * out.yKth, KTH_MIN, KTH_MAX);
    // Làm mềm gain.
    s.Kx = lowPass(s.Kx, Kx_raw, FUZZY_LP_ALPHA);
    s.Ky = lowPass(s.Ky, Ky_raw, FUZZY_LP_ALPHA);
    s.Kth = lowPass(s.Kth, Kth_raw, FUZZY_LP_ALPHA);

    out.Kx = s.Kx;
    out.Ky = s.Ky;
    out.Kth = s.Kth;
}

#endif

float z[2];
float z_dot[2];
float dhat[2];
float dhat_old[2];
float Vr_hat[2];

// Optional internal discrete PID states
float e_int[2];

```

//IFO

```

#ifndef IFO_OBSERVER_H
#define IFO_OBSERVER_H
#include <Arduino.h>

```

```

const bool IFO_USE_PID = false; // Ban đầu nên
// để false để tránh bù hai lớp.

```

```

struct IFOSState {

```

```

float e_pre[2];
float eVhat_delay[2];
float t_last;
};

inline void IFO_Reset(IFOState &s) {
    for (int i = 0; i < 2; i++) {
        s.z[i] = 0.0f;
        s.z_dot[i] = 0.0f;
        s.dhat[i] = 0.0f;
        s.dhat_old[i] = 0.0f;
        s.Vr_hat[i] = 0.0f;
        s.e_int[i] = 0.0f;
        s.e_pre[i] = 0.0f;
        s.eVhat_delay[i] = 0.0f;
    }
    s.t_last = -1.0f;
}

inline void IFO_Update(
    IFOState &s,
    float ex, float ey, float thetai,
    float vr, float wr,
    float v_real, float w_real,
    float theta,
    float t_ifo,
    float ePID_v, float ePID_w,
    float Ts
) {
    const float L0[2][3] = {
        {20.0f, 0.0f, 0.0f},
        {0.0f, 0.0f, 20.0f}
    };

    const float tau_L = 0.5f;
    const float T_init = 5.0f;
    const float beta_d = 0.001f;

    const float Kp[2] = {7.0f, 6.0f};
    const float Ki[2] = {200.0f, 200.0f};
    const float Kd[2] = {0.012f, 0.012f};
    const float eVhat_max[2] = {10.0f, 10.0f};

    const float T_hold = 2.0f;
    const float T_ramp = 2.5f;
    const float eps_d = 1e-3f;

    if (Ts <= 0.0f) return;
    if (t_ifo < 0.0f) t_ifo = 0.0f;

    float x_e = cos(theta) * ex + sin(theta) * ey;
    float y_e = -sin(theta) * ex + cos(theta) * ey;

    float f_xpe[3] = {
        wr * y_e,
        vr * sin(thetae) - wr * x_e,
        0.0f
    };

    float g1_xpe[3][2] = {
        {1.0f, -y_e},
        {0.0f, x_e},
    };

    {0.0f, 1.0f}
    };

    float g2_xpe[3][2] = {
        {1.0f, -y_e},
        {0.0f, x_e},
        {0.0f, 1.0f}
    };

    float p_xpe[2] = {x_e, thetai};

    float dhat_raw[2] = {
        s.z[0] + p_xpe[0],
        s.z[1] + p_xpe[1]
    };

    float tt = t_ifo / T_init;
    float kappa = 1.0f - exp(-(tt * tt));

    float dhat_smooth[2] = {
        kappa * dhat_raw[0],
        kappa * dhat_raw[1]
    };

    s.dhat_old[0] = beta_d * dhat_smooth[0] + (1.0f - beta_d) * s.z[0];
    s.dhat_old[1] = beta_d * dhat_smooth[1] + (1.0f - beta_d) * s.z[1];

    s.Vr_hat[0] = v_real - s.dhat_old[0];
    s.Vr_hat[1] = w_real - s.dhat_old[1];

    float evh = 0.0f;
    float ewh = 0.0f;

    if (IFO_USE_PID) {
        evh = s.eVhat_delay[0];
        ewh = s.eVhat_delay[1];

        if ((s.t_last < 0.0f) || ((t_ifo - s.t_last) >= (Ts - 1e-6f))) {
            float ePID[2] = {ePID_v, ePID_w};
            float eVhat_new[2];

            for (int i = 0; i < 2; i++) {
                float e_int_new = s.e_int[i] + Ts * ePID[i];
                float de = (ePID[i] - s.e_pre[i]) / Ts;

                eVhat_new[i] = Kp[i] * ePID[i] + Ki[i] * e_int_new + Kd[i] * de;

                if (eVhat_new[i] > eVhat_max[i])
                    eVhat_new[i] = eVhat_max[i];
                if (eVhat_new[i] < -eVhat_max[i])
                    eVhat_new[i] = -eVhat_max[i];

                if (fabs(eVhat_new[i]) < eVhat_max[i]) {
                    s.e_int[i] = e_int_new;
                }

                s.e_pre[i] = ePID[i];
                s.eVhat_delay[i] = eVhat_new[i];
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    s.t_last = t_ifo;
}
} else {
    s.eVhat_delay[0] = 0.0f;
    s.eVhat_delay[1] = 0.0f;
}

float gain_scale = 1.0f - exp(-t_ifo / tau_L);
float Lxpe[2][3];
for (int i = 0; i < 2; i++) {
    for (int j = 0; j < 3; j++) {
        Lxpe[i][j] = gain_scale * L0[i][j];
    }
}

float u[2];
u[0] = (vr * cos(thetae) - v_real) - evh;
u[1] = (wr - w_real) - ewh;

float g2_z[3] = {0.0f, 0.0f, 0.0f};
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    for (int j = 0; j < 2; j++) {
        g2_z[i] += g2_xpe[i][j] * s.z[j];
    }
}

float g2_p[3] = {0.0f, 0.0f, 0.0f};
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    for (int j = 0; j < 2; j++) {
        g2_p[i] += g2_xpe[i][j] * p_xpe[j];
    }
}

float g1_u[3] = {0.0f, 0.0f, 0.0f};
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    for (int j = 0; j < 2; j++) {
        g1_u[i] += g1_xpe[i][j] * u[j];
    }
}

// SMC PI
#ifdef SMC_PI_CONTROL_H
#define SMC_PI_CONTROL_H

#include <Arduino.h>
#include "Config.h"

struct SMCPIState {
    float int_ev;
    float int_ew;
    float Vc_prev;
    float Wc_prev;
    bool initialized;
};

struct SMCPIOutput {
    float V_cmd;
    float W_cmd;

float core_term[3];
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    core_term[i] = g2_p[i] + f_xpe[i] + g1_u[i];
}

float L_g2_z[2] = {0.0f, 0.0f};
float L_core[2] = {0.0f, 0.0f};

for (int i = 0; i < 2; i++) {
    for (int j = 0; j < 3; j++) {
        L_g2_z[i] += Lxpe[i][j] * g2_z[j];
        L_core[i] += Lxpe[i][j] * core_term[j];
    }
}

for (int i = 0; i < 2; i++) {
    s.z_dot[i] = -L_g2_z[i] - kappa * L_core[i];
    s.z[i] += s.z_dot[i] * Ts;
}

float alpha_out = 0.0f;
if (t_ifo <= T_hold) {
    alpha_out = 0.0f;
} else {
    float tr = t_ifo - T_hold;
    if (tr < T_ramp) {
        float r = tr / T_ramp;
        alpha_out = r * r * (3.0f - 2.0f * r);
    } else {
        alpha_out = 1.0f;
    }
}

s.dhat[0] = alpha_out * s.dhat_old[0];
s.dhat[1] = alpha_out * s.dhat_old[1];

if (fabs(s.dhat[0]) < eps_d) s.dhat[0] = 0.0f;
if (fabs(s.dhat[1]) < eps_d) s.dhat[1] = 0.0f;
}

#endif

float ev;
float ew;
float sv;
float sw;

float dV_smc;
float dW_smc;
float dV_eso;
float dW_eso;

float Dv_hat_used;
float Dw_hat_used;

float Vc_dot_ref;
float Wc_dot_ref;
float F_cmd;
float M_cmd;
};

```

```

inline void SMCPI_Reset(SMCPIState &s) {
    s.int_ev = 0.0f;
    s.int_ew = 0.0f;
    s.Vc_prev = 0.0f;
    s.Wc_prev = 0.0f;
    s.initialized = false;
}

inline float smc_sat(float x) {
    if (x > 1.0f) return 1.0f;
    if (x < -1.0f) return -1.0f;
    return x;
}

inline void SMCPI_Update(
    SMCPIState &s,
    SMCPIOutput &out,
    float Vc,
    float Wc,
    float v_real,
    float w_real,
    float Dv_hat,
    float Dw_hat,
    float Ts
) {
    if (Ts <= 0.0f) return;

    // Sai số vận tốc
    out.ev = Vc - v_real;
    out.ew = Wc - w_real;

    out.Dv_hat_used = Dv_hat;
    out.Dw_hat_used = Dw_hat;

    s.int_ev += out.ev * Ts;
    s.int_ew += out.ew * Ts;
    s.int_ev = constrain(s.int_ev, -
        SMC_INT_EV_MAX, SMC_INT_EV_MAX);
    s.int_ew = constrain(s.int_ew, -
        SMC_INT_EW_MAX, SMC_INT_EW_MAX);

    out.sv = out.ev + SMC_LAMBDA_V * s.int_ev;
    out.sw = out.ew + SMC_LAMBDA_W *
        s.int_ew;

    if (!s.initialized) {
        out.Vc_dot_ref = 0.0f;
        out.Wc_dot_ref = 0.0f;

        s.initialized = true;
    } else {
        out.Vc_dot_ref = (Vc - s.Vc_prev) / Ts;
        out.Wc_dot_ref = (Wc - s.Wc_prev) / Ts;
    }

    s.Vc_prev = Vc;
    s.Wc_prev = Wc;

    out.dV_smc = SMC_KV_CORR *
        smc_sat(out.sv / SMC_PHI_V);
    out.dW_smc = SMC_KW_CORR *
        smc_sat(out.sw / SMC_PHI_W);

    out.dV_eso = -SMC_ESO_VEL_GAIN *
        Dv_hat;
    out.dW_eso = -SMC_ESO_ANG_GAIN *
        Dw_hat;
    out.dV_eso = constrain(out.dV_eso, -
        SMC_DV_ESO_MAX, SMC_DV_ESO_MAX);
    out.dW_eso = constrain(out.dW_eso, -
        SMC_DW_ESO_MAX, SMC_DW_ESO_MAX);

    out.V_cmd = Vc + out.dV_smc + out.dV_eso;
    out.W_cmd = Wc + out.dW_smc + out.dW_eso;

    out.V_cmd = constrain(out.V_cmd, -
        V_CMD_MAX, V_CMD_MAX);
    out.W_cmd = constrain(out.W_cmd, -
        W_CMD_MAX, W_CMD_MAX);

    float a_v_cmd = out.Vc_dot_ref +
        SMC_LAMBDA_V * out.ev + SMC_KV_CORR
        * smc_sat(out.sv / SMC_PHI_V) - Dv_hat;
    float a_w_cmd = out.Wc_dot_ref +
        SMC_LAMBDA_W * out.ew + SMC_KW_CORR
        * smc_sat(out.sw / SMC_PHI_W) - Dw_hat;

    out.F_cmd = ROBOT_MASS * a_v_cmd;
    out.M_cmd = ROBOT_INERTIA_Z * a_w_cmd;

    out.F_cmd = constrain(out.F_cmd, -
        F_CMD_MAX, F_CMD_MAX);
    out.M_cmd = constrain(out.M_cmd, -
        M_CMD_MAX, M_CMD_MAX);
}

// Trajectory tracking control
#ifndef TRAJECTORY_CONTROL_H
#define TRAJECTORY_CONTROL_H

#include <Arduino.h>
#include "RobotGlobals.h"
#include "Utils.h"
#include "IFOObserver.h"
#include "FuzzyGain.h"
#include "SMCPIControl.h"
#include "ExtendedStateObserver.h"

#endif

```

```

    xd_2dot = -(R / 100.0f) * omega * omega *
cos(omega * t);
    yd_2dot = -(R / 100.0f) * omega * omega *
sin(omega * t);

```

```

    Thetad = normalizeAngle(omega * t + pi / 2.0f);

```

```

    x1d = xd + b * cos(Thetad);
    y1d = yd + b * sin(Thetad);

```

```

    float den = xd_dot * xd_dot + yd_dot * yd_dot;
    if (fabs(den) < 1e-6f) {
        wd = 0.0f;
    } else {
        wd = (yd_2dot * xd_dot - xd_2dot * yd_dot) /
den;
    }

```

```

    x1d_dot = xd_dot - b * wd * sin(Thetad);
    y1d_dot = yd_dot + b * wd * cos(Thetad);

```

```

    if (fabs(b) < 1e-6f) {
        vr = 0.0f;
        wr = 0.0f;
    } else {
        vr = cos(Thetad) * x1d_dot + sin(Thetad) *
y1d_dot;
        wr = (-sin(Thetad) * x1d_dot + cos(Thetad) *
y1d_dot) / b;
    }
}

```

```

inline void computeTrackingErrors() {
    X1 = x + b * cos(theta);
    Y1 = y + b * sin(theta);

```

```

    ex = xd - x;
    ey = yd - y;
    eth = normalizeAngle(Thetad - theta);

```

```

    xe = cos(theta) * ex + sin(theta) * ey;
    ye = -sin(theta) * ex + cos(theta) * ey;
    thetai = eth;
}

```

```

inline void computeFuzzyTrackingControl() {
#ifdef USE_FUZZY_GAIN
    FuzzyGain_Update(fuzzyGainState, fuzzyGain,
xe, ye, thetai, CONTROL_TS);
    Kx = fuzzyGain.Kx;
    Ky = fuzzyGain.Ky;
    Kth = fuzzyGain.Kth;
#else
    Kx = KX_NOM;
    Ky = KY_NOM;
    Kth = KTH_NOM;
    fuzzyGain.Kx = Kx;
    fuzzyGain.Ky = Ky;
    fuzzyGain.Kth = Kth;
    fuzzyGain.e_pos = sqrt(xe * xe + ye * ye);
    fuzzyGain.e_th = fabs(thetai);
#endif
}

```

```

Vc = vr * cos(thetae) + Kx * xe;
Wc = wr + vr * Ky * ye + Kth * sin(thetae);
}

```

```

inline void
updateIFOObserverAndCompensation() {
#ifdef USE_IFO_OBSERVER
    if (t > IFO_START_TIME) {
        float t_ifo = t - IFO_START_TIME;

        float ePID_v = 0.0f;
        float ePID_w = 0.0f;

        IFO_Update(
            ifo,
            ex, ey, thetai, // ex, ey là sai số hệ quán tính
            vr, wr,
            vthuc, wthuc,
            theta,
            t_ifo,
            ePID_v, ePID_w,
            CONTROL_TS
        );
        dhat[0] = ifo.dhat[0];
        dhat[1] = ifo.dhat[1];
    } else {
        IFO_Reset(ifo);
        dhat[0] = 0.0f;
        dhat[1] = 0.0f;
    }
}
#else
    dhat[0] = 0.0f;
    dhat[1] = 0.0f;
#endif
}

```

```

    dhat[0] = constrain(dhat[0], -DHAT0_MAX,
DHAT0_MAX);
    dhat[1] = constrain(dhat[1], -DHAT1_MAX,
DHAT1_MAX);

```

```

    dV_obs = (-dhat[0]) + 2.0f * ye * dhat[1];
    dW_obs = dhat[1];

```

```

    dV_obs = constrain(dV_obs, -DV_OBS_MAX,
DV_OBS_MAX);
    dW_obs = constrain(dW_obs, -DW_OBS_MAX,
DW_OBS_MAX);

```

```

    updateAlpha();

```

```

    dV_obs_use = alpha * KOBS_V * dV_obs;
    dW_obs_use = alpha * KOBS_W * dW_obs;
}

```

```

inline void updateESOfForSMCPI() {
#ifdef USE_ESO_SMC
    if (t > ESO_START_TIME) {
        float u1_eso = globalVRR + globalVLL;
        float u2_eso = globalVRR - globalVLL;

```

```

        ESO_Update(

```

```

    eso,
    eso_out,
    vthuc,
    wthuc,
    u1_eso,
    u2_eso,
    CONTROL_TS
);
} else {
    ESO_Reset(eso);
    ESO_ClearOutput(eso_out);
}
#else
    ESO_Reset(eso);
    ESO_ClearOutput(eso_out);
#endif
}

inline void updateSMCPIControl() {
    updateESOForSMCPI();

#ifdef USE_SMC_PI
    float Dv_hat_use = 0.0f;
    float Dw_hat_use = 0.0f;
#endif
#ifdef USE_ESO_SMC
    Dv_hat_use = eso.Dv_hat;
    Dw_hat_use = eso.Dw_hat;
#endif

    SMCPI_Update(
        smcpi,
        smcpi_out,
        Vc,
        Wc,
        vthuc,
        wthuc,
        Dv_hat_use,
        Dw_hat_use,
        CONTROL_TS
    );

    V_cmd_final = smcpi_out.V_cmd + dV_obs_use;

// Các hàm Utility
#ifdef UTILS_H
#define UTILS_H

#include <Arduino.h>
#include "RobotGlobals.h"

inline float sat01(float value) {
    if (value < 0.0f) return 0.0f;
    if (value > 1.0f) return 1.0f;
    return value;
}

inline float normalizeAngle(float angle) {
    while (angle > PI_ROBOT) angle -= 2.0f * PI_ROBOT;
    while (angle < -PI_ROBOT) angle += 2.0f * PI_ROBOT;

    W_cmd_final = smcpi_out.W_cmd + dW_obs_use;
} else
    smcpi_out.V_cmd = Vc;
    smcpi_out.W_cmd = Wc;
    smcpi_out.ev = Vc - vthuc;
    smcpi_out.ew = Wc - wthuc;
    smcpi_out.sv = 0.0f;
    smcpi_out.sw = 0.0f;
    smcpi_out.dV_smc = 0.0f;
    smcpi_out.dW_smc = 0.0f;
    smcpi_out.dV_eso = 0.0f;
    smcpi_out.dW_eso = 0.0f;
    smcpi_out.Dv_hat_used = 0.0f;
    smcpi_out.Dw_hat_used = 0.0f;
    smcpi_out.F_cmd = 0.0f;
    smcpi_out.M_cmd = 0.0f;
    V_cmd_final = Vc + dV_obs_use;
    W_cmd_final = Wc + dW_obs_use;
#endif

    V_cmd_final = constrain(V_cmd_final, -V_CMD_MAX, V_CMD_MAX);
    W_cmd_final = constrain(W_cmd_final, -W_CMD_MAX, W_CMD_MAX);

    Vc = V_cmd_final;
    Wc = W_cmd_final;
}

inline void computeWheelReferences() {
    globalVRR = (2.0f * Vc + 1 * Wc) / 2.0f;
    globalVLL = 2.0f * Vc - globalVRR;
}

inline void quydao() {
    if (!check) return;

    computeCircleTrajectory();
    computeTrackingErrors();

    t += CONTROL_TS;
}

#endif

    return angle;
}

inline void updateAlpha() {
    float e_norm = sqrt(ex * ex + ey * ey);
    float a_raw = sat01((e_norm - OBS_E_MIN) / (OBS_E_MAX - OBS_E_MIN));

    float da = a_raw - alpha_prev;
    if (da > OBS_ALPHA_RATE) da = OBS_ALPHA_RATE;
    if (da < -OBS_ALPHA_RATE) da = -OBS_ALPHA_RATE;

    alpha = alpha_prev + da;
    alpha_prev = alpha;
}

```

```

inline void stopMotors() {
    globalVRR = 0.0f;
    globalVLL = 0.0f;
    RPM_input1 = 0.0f;
    RPM_input2 = 0.0f;
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M1, 0);
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M2, 0);
}

inline void resetMotorPIDStates() {
    Theta_now1 = 0.0f;
    Theta_prev1 = 0.0f;
    Theta_now2 = 0.0f;
    Theta_prev2 = 0.0f;

    V1_output = 0.0f;
    Vr_output = 0.0f;
    RPM_output1 = 0.0f;
    RPM_input1 = 0.0f;
    RPM_output2 = 0.0f;
    RPM_input2 = 0.0f;

    V1 = 0.0f;
    V2 = 0.0f;

    error_now1 = 0.0f;
    error_prev1 = 0.0f;
    integ_now1 = 0.0f;
    integ_prev1 = 0.0f;

    error_now2 = 0.0f;
    error_prev2 = 0.0f;
    integ_now2 = 0.0f;
    integ_prev2 = 0.0f;

    noInterrupts();
    dem_motor1 = 0;
    dem_motor2 = 0;
    dem_motor11 = 0;
    dem_motor22 = 0;
    interrupts();
}

inline void resetRunStates() {
    t = 0.0f;

    x = 0.0f;
    y = 0.0f;
    theta = 0.0f;
    toadox = 0.0f;
    toadoy = 0.0f;

    v = 0.0f;
    w = 0.0f;

    // WEB handlers
#ifdef WEB_HANDLERS_H
#define WEB_HANDLERS_H

#include <Arduino.h>
#include <WebServer.h>

    vthuc = 0.0f;
    wthuc = 0.0f;

    xd = 0.0f;
    yd = 0.0f;
    Thetad = 0.0f;
    xdat = 0.0f;
    ydat = 0.0f;

    ex = 0.0f;
    ey = 0.0f;
    eth = 0.0f;
    xe = 0.0f;
    ye = 0.0f;
    thetae = 0.0f;

    Vc = 0.0f;
    Wc = 0.0f;
    V_cmd_final = 0.0f;
    W_cmd_final = 0.0f;
    vr = 0.0f;
    wr = 0.0f;

    dhat[0] = 0.0f;
    dhat[1] = 0.0f;
    dV_obs = 0.0f;
    dW_obs = 0.0f;
    dV_obs_use = 0.0f;
    dW_obs_use = 0.0f;

    alpha = 0.0f;
    alpha_prev = 0.0f;

    IFO_Reset(ifo);
    FuzzyGain_Reset(fuzzyGainState);
    fuzzyGain.Kx = KX_NOM;
    fuzzyGain.Ky = KY_NOM;
    fuzzyGain.Kth = KTH_NOM;
    fuzzyGain.e_pos = 0.0f;
    fuzzyGain.e_th = 0.0f;
    fuzzyGain.dxe = 0.0f;
    fuzzyGain.dye = 0.0f;
    fuzzyGain.dthetae = 0.0f;
    fuzzyGain.yKx = 0.0f;
    fuzzyGain.yKy = 0.0f;
    fuzzyGain.yKth = 0.0f;
    SMCPI_Reset(smcpi);
    ESO_Reset(eso);
    ESO_ClearOutput(eso_out);

    resetMotorPIDStates();
    stopMotors();
}

#endif

```

```

#include "RobotGlobals.h"
#include "Utils.h"
inline void handleRoot() {
    String motorData = "{" + String(Kx, 4) +
        "\",\"Ky\": " + String(Ky, 4) +
        "\",\"Kth\": " + String(Kth, 4) +
        "\",\"Kx_f\": " + String(fuzzyGain.Kx, 4) +
        "\",\"Ky_f\": " + String(fuzzyGain.Ky, 4) +
        "\",\"Kth_f\": " + String(fuzzyGain.Kth, 4) +
        "\",\"yKx_fz\": " + String(fuzzyGain.yKx, 4) +
        "\",\"yKy_fz\": " + String(fuzzyGain.yKy, 4) +
        "\",\"yKth_fz\": " + String(fuzzyGain.yKth, 4) +
        "\",\"dxe_fz\": " + String(fuzzyGain.dxe, 6) +
        "\",\"dye_fz\": " + String(fuzzyGain.dye, 6) +
        "\",\"dthe_fz\": " + String(fuzzyGain.dthetae, 6) +
        "\",\"toadox\": " + String(toadox) +
        "\",\"toadoy\": " + String(toadoy) +
        "\",\"xdat\": " + String(xdat) +
        "\",\"ydat\": " + String(ydat) +
        "\",\"theta\": " + String(theta, 6) +
        "\",\"Thetad\": " + String(Thetad, 6) +
        "\",\"Vc\": " + String(Vc, 6) +
        "\",\"Wc\": " + String(Wc, 6) +
        "\",\"Vcmd\": " + String(V_cmd_final, 6) +
        "\",\"Wcmd\": " + String(W_cmd_final, 6) +
        "\",\"vthuc\": " + String(vthuc, 6) +
        "\",\"wthuc\": " + String(wthuc, 6) +
        "\",\"ex\": " + String(ex * 100.0f, 4) +
        "\",\"ey\": " + String(ey * 100.0f, 4) +
        "\",\"eth\": " + String(eth, 6) +
        "\",\"xe\": " + String(xe, 6) +
        "\",\"ye\": " + String(ye, 6) +
        "\",\"thetae\": " + String(thetae, 6) +
        "\",\"sv\": " + String(smcp_i_out.sv, 6) +
        "\",\"sw\": " + String(smcp_i_out.sw, 6) +
        "\",\"dVsmc\": " + String(smcp_i_out.dV_smc, 6) +
        "\",\"dWsmc\": " + String(smcp_i_out.dW_smc, 6) +
        "\",\"dVeso\": " + String(smcp_i_out.dV_eso, 6) +
        "\",\"dWeso\": " + String(smcp_i_out.dW_eso, 6) +
        "\",\"Fcmd\": " + String(smcp_i_out.F_cmd, 6) +
        "\",\"Mcmd\": " + String(smcp_i_out.M_cmd, 6) +
        "\",\"vhat_eso\": " + String(eso.v_hat, 6) +
        "\",\"what_eso\": " + String(eso.w_hat, 6) +
        "\",\"Dvhat_eso\": " + String(eso.Dv_hat, 6) +
        "\",\"Dwhat_eso\": " + String(eso.Dw_hat, 6) +
        "\",\"ev_eso\": " + String(eso_out.e_v, 6) +
        "\",\"ew_eso\": " + String(eso_out.e_w, 6) +
        "\",\"t\": " + String(t, 3) +
        "\",\"R\": " + String(R) +
        "\",\"omega\": " + String(omega, 4) +
        "\",\"alpha\": " + String(alpha, 4) +
        "\",\"dhat0\": " + String(dhat[0], 6) +
        "\",\"dhat1\": " + String(dhat[1], 6) +
        "\",\"dVobs\": " + String(dV_obs_use, 6) +
        "\",\"dWobs\": " + String(dW_obs_use, 6) +
        "\",\"z0\": " + String(ifo.z[0], 6) +
        "\",\"z1\": " + String(ifo.z[1], 6) +
        "}";

    server.send(200, "application/json", motorData);
}

inline void handleStart() {
    check = true;
}

```

```

resetRunStates();

relayStep = 0;
relayTimer = millis();
digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // OFF
relayState = HIGH;

server.send(200, "text/html", "ok");
}

inline void handleStop() {
    check = false;

    stopMotors();

    relayStep = 0;
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // OFF
    relayState = HIGH;

    server.send(200, "text/html", "stop");
}

inline void handleContinue() {
    String bankinh_str = server.arg("bankinh");
    if (bankinh_str.length() > 0) R =
bankinh_str.toFloat();

    String omega_str = server.arg("omega");
    if (omega_str.length() > 0) omega =
omega_str.toFloat();

    // Cho phép chỉnh gain nền khi tắt fuzzy, hoặc test
    trực tiếp.
    String kx_str = server.arg("kx");

    if (kx_str.length() > 0) Kx = kx_str.toFloat();

    String ky_str = server.arg("ky");
    if (ky_str.length() > 0) Ky = ky_str.toFloat();

    String ktheta_str = server.arg("ktheta");
    if (ktheta_str.length() > 0) Kth =
ktheta_str.toFloat();

    server.send(200, "text/html", "continue");
}

inline void handleReset() {
    check = false;

    resetRunStates();

    relayStep = 0;
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // OFF
    relayState = HIGH;

    server.send(200, "text/html", "reset");
}

inline void setupWebServer() {
    server.on("/", handleRoot);
    server.on("/start", handleStart);
    server.on("/stop", handleStop);
    server.on("/reset", handleReset);
    server.on("/continue", handleContinue);
    server.begin();
}

#endif

// Motor PID
#ifndef MOTOR_PID_H
#define MOTOR_PID_H

#include <Arduino.h>
#include "RobotGlobals.h"

inline void setupMotorPins() {
    pinMode(MOTOR1_PIN1, OUTPUT);
    pinMode(MOTOR1_PIN2, OUTPUT);
    pinMode(MOTOR1_EN, OUTPUT);

    pinMode(MOTOR2_PIN1, OUTPUT);
    pinMode(MOTOR2_PIN2, OUTPUT);
    pinMode(MOTOR2_EN, OUTPUT);

    ledcSetup(PWM_CHANNEL_M1, PWM_FREQ, PWM_RESOLUTION);
    ledcSetup(PWM_CHANNEL_M2, PWM_FREQ, PWM_RESOLUTION);
    ledcAttachPin(MOTOR1_EN, PWM_CHANNEL_M1);
    ledcAttachPin(MOTOR2_EN, PWM_CHANNEL_M2);
}

inline void PID1() {
    RPM_input1 = fabs((globalVRR / (WHEEL_DIAMETER * PI_ROBOT)) * 60.0f);

    Theta_now1 = dem_motor1 / ENCODER_PPR;

```

```

float dt1s = dt1 / 1000.0f;
if (dt1s <= 0.0f) return;

RPM_output1 = (Theta_now1 - Theta_prev1) / dt1s * 60.0f;
Vr_output = (RPM_output1 / 60.0f) * (WHEEL_DIAMETER * PI_ROBOT);

error_now1 = RPM_input1 - RPM_output1;
integ_now1 = integ_prev1 + dt1s * (error_now1 + error_prev1) / 2.0f;

V1 = PID_KP * error_now1
    + PID_KI * integ_now1
    + PID_KD * (error_now1 - error_prev1) / dt1s;

if (V1 > MOTOR_VMAX) {
    V1 = MOTOR_VMAX;
    integ_now1 = integ_prev1;
}

if (V1 < MOTOR_VMIN) {
    V1 = MOTOR_VMIN;
    integ_now1 = integ_prev1;
}

PWMval1 = int(255.0f * fabs(V1) / MOTOR_VMAX);
if (PWMval1 > 255) PWMval1 = 255;

if (globalVRR > 0.0f) {
    digitalWrite(MOTOR1_PIN1, LOW);
    digitalWrite(MOTOR1_PIN2, HIGH);
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M1, PWMval1);
} else if (globalVRR < 0.0f) {
    digitalWrite(MOTOR1_PIN1, HIGH);
    digitalWrite(MOTOR1_PIN2, LOW);
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M1, PWMval1);
} else {
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M1, 0);
}

Theta_prev1 = Theta_now1;
integ_prev1 = integ_now1;
error_prev1 = error_now1;
}

inline void PID2() {
    RPM_input2 = fabs((globalVLL / (WHEEL_DIAMETER * PI_ROBOT)) * 60.0f);

    Theta_now2 = dem_motor2 / ENCODER_PPR;

    float dt2s = dt2 / 1000.0f;
    if (dt2s <= 0.0f) return;

    RPM_output2 = (Theta_now2 - Theta_prev2) / dt2s * 60.0f;
    V1_output = (RPM_output2 / 60.0f) * (WHEEL_DIAMETER * PI_ROBOT);

    error_now2 = RPM_input2 - RPM_output2;
    integ_now2 = integ_prev2 + dt2s * (error_now2 + error_prev2) / 2.0f;

    V2 = PID_KP * error_now2
        + PID_KI * integ_now2
        + PID_KD * (error_now2 - error_prev2) / dt2s;

    if (V2 > MOTOR_VMAX) {

```

```

    V2 = MOTOR_VMAX;
    integ_now2 = integ_prev2;
}

if (V2 < MOTOR_VMIN) {
    V2 = MOTOR_VMIN;
    integ_now2 = integ_prev2;
}

PWMval2 = int(255.0f * fabs(V2) / MOTOR_VMAX);
if (PWMval2 > 255) PWMval2 = 255;

if (globalVLL > 0.0f) {
    digitalWrite(MOTOR2_PIN1, HIGH);
    digitalWrite(MOTOR2_PIN2, LOW);
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M2, PWMval2);
} else if (globalVLL < 0.0f) {
    digitalWrite(MOTOR2_PIN1, LOW);
    digitalWrite(MOTOR2_PIN2, HIGH);
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M2, PWMval2);
} else {
    ledcWrite(PWM_CHANNEL_M2, 0);
}

Theta_prev2 = Theta_now2;
integ_prev2 = integ_now2;
error_prev2 = error_now2;
}

#endif

//Relay control Tạo lỗi mất hiệu suất một phần của động cơ
#ifndef RELAY_CONTROL_H
#define RELAY_CONTROL_H

#include <Arduino.h>
#include "RobotGlobals.h"

inline void setupRelay() {
    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // OFF
    relayState = HIGH;
    relayStep = 0;
    relayTimer = millis();
}

inline void updateRelaySchedule(unsigned long currentTime) {
    if (!check) return;

    switch (relayStep) {
        case 0: // OFF 30s
            if (currentTime - relayTimer >= 30000UL) {
                digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // ON
                relayState = LOW;
                relayTimer = currentTime;
                relayStep = 1;
            }
            break;

        case 1: // ON 45s
            if (currentTime - relayTimer >= 45000UL) {
                digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // OFF

```

```
    relayState = HIGH;
    relayTimer = currentTime;
    relayStep = 2;
}
break;

case 2: // OFF 45s
    if (currentTime - relayTimer >= 45000UL) {
        digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // ON
        relayState = LOW;
        relayTimer = currentTime;
        relayStep = 3;
    }
    break;

default:
    relayStep = 0;
    relayTimer = currentTime;
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
    relayState = HIGH;
    break;
}
}

#endif
```

// CHƯƠNG TRÌNH GIAO DIỆN GIÁM SÁT TRÊN LAPTOP

```
// Quydao_FTC_FBO_SMCESO.py
```

```
import sys
import cv2
from PyQt6 import QtCore, QtGui, QtWidgets
from PyQt6.QtCore import QTimer
from matplotlib.backends.backend_qtagg import FigureCanvasQTAgg as FigureCanvas
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.figure import Figure
from matplotlib.lines import Line2D
import requests
import threading
import numpy as np
import random
from collections import deque
```

```
ip1, ip2, ip3, ip4 = 192, 168, 137, 109
```

```
ip_address = f'{ip1}.{ip2}.{ip3}.{ip4}'
url = f'http://{ip_address}:8080'
```

```
class GreenTracker:
```

```
    def __init__(
        self,
        max_points=800,
        min_area=500,
        lower_green=(35, 80, 50),
        upper_green=(85, 255, 255),
        trail_color=(0, 255, 0)
    ):
        self.MAX_POINTS = max_points
        self.MIN_AREA = min_area
        self.LOWER_GREEN = np.array(lower_green, dtype=np.uint8)
        self.UPPER_GREEN = np.array(upper_green, dtype=np.uint8)
        self.trail_color = trail_color

        self.trail = deque(maxlen=self.MAX_POINTS)
        self.last_center = None
        self.last_radius = None
```

```
    def reset_trail(self):
        self.trail.clear()
```

```
    def process(self, frame, flip=True):
        """
        frame BGR -> trả ra (frame đã vẽ), center, radius
        """
        if flip:
            frame = cv2.flip(frame, 1)
```

```

blurred = cv2.GaussianBlur(frame, (11, 11), 0)
hsv = cv2.cvtColor(blurred, cv2.COLOR_BGR2HSV)

mask = cv2.inRange(hsv, self.LOWER_GREEN, self.UPPER_GREEN)
mask = cv2.erode(mask, None, iterations=2)
mask = cv2.dilate(mask, None, iterations=2)

        contours, _ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

center = None
radius = None

if contours:
    c = max(contours, key=cv2.contourArea)
    area = cv2.contourArea(c)

    if area > self.MIN_AREA:
        M = cv2.moments(c)
        if M["m00"] != 0:
            center = (int(M["m10"]/M["m00"]), int(M["m01"]/M["m00"]))
            self.trail.appendleft(center)
            cv2.circle(frame, center, 3, self.trail_color, -1)

        (x, y), radius = cv2.minEnclosingCircle(c)
        radius = int(radius)
        cv2.circle(frame, (int(x), int(y)), radius, self.trail_color, 2)

for i in range(1, len(self.trail)):
    if self.trail[i-1] is None or self.trail[i] is None:
        continue
    thickness = int(np.sqrt(self.MAX_POINTS / float(i + 1)) * 2)
    cv2.line(frame, self.trail[i-1], self.trail[i], self.trail_color, thickness)

self.last_center = center
self.last_radius = radius
return frame, center, radius

class Ui_MainWindow(object):
    def setupUi(self, MainWindow):
        MainWindow.setObjectName("MainWindow")
        MainWindow.resize(1300, 800)
        MainWindow.setContextMenuPolicy(QtCore.Qt.ContextMenuPolicy.DefaultContext
Menu)
        MainWindow.setLayoutDirection(QtCore.Qt.LayoutDirection.LeftToRight)
        MainWindow.setAutoFillBackground(False)
        self.centralwidget = QtWidgets.QWidget(parent=MainWindow)
        MainWindow.setStyleSheet("""
            QMainWindow {
                background-color: white;
            }
        """)

```

```

        QWidget {
            background-color: white;
        }
        """
self.centralwidget.setObjectName("centralwidget")

self.start = QtWidgets.QPushButton(parent=self.centralwidget)
self.start.setGeometry(QtCore.QRect(10, 10, 71, 31))
self.start.setStyleSheet("background:#00e676; font-weight:bold;")
self.start.setObjectName("start")

self.reset = QtWidgets.QPushButton(parent=self.centralwidget)
self.reset.setGeometry(QtCore.QRect(90, 10, 71, 31))
self.reset.setStyleSheet("background:#fff176; font-weight:bold;")
self.reset.setObjectName("reset")

self.reset_view = QtWidgets.QPushButton(parent=self.centralwidget)
self.reset_view.setGeometry(QtCore.QRect(10, 50, 150, 31))
self.reset_view.setStyleSheet("background:#b3e5fc; font-weight:bold;")
self.reset_view.setObjectName("reset_view")

MainWindow.setCentralWidget(self.centralwidget)
self.menubar = QtWidgets.QMenuBar(parent=MainWindow)
self.menubar.setGeometry(QtCore.QRect(0, 0, 800, 18))
self.menubar.setObjectName("menubar")
MainWindow.setMenuBar(self.menubar)
self.statusbar = QtWidgets.QStatusBar(parent=MainWindow)
self.statusbar.setObjectName("statusbar")
MainWindow.setStatusBar(self.statusbar)

self.reset.clicked.connect(self.resetall)
self.start.clicked.connect(self.toggleButton)

if hasattr(self, "reset_view_axes"):
    self.reset_view.clicked.connect(self.reset_view_axes)

self.is_running = False

self.update_thread_running = True
self.update_thread = threading.Thread(target=self.update_values, daemon=True)
self.update_thread.start()

self.retranslateUi(MainWindow)
QtCore.QMetaObject.connectSlotsByName(MainWindow)

def safe_remove(self, name: str):
    ln = getattr(self, name, None)
    if ln is not None:
        try:
            ln.remove()

```

```

except ValueError:
    pass
setattr(self, name, None)

def update_values(self):
    while self.update_thread_running:
        if self.is_running:
            try:
                response = requests.get(f"http://{self.ip_address}/")
                if response.status_code == 200:
                    data = response.json()
                    self.update_ui_with_data(data)
                else:
                    print(f"Failed to fetch data. Status code: {response.status_code}")
                    QtCore.QThread.msleep(50)
            except Exception as e:
                print("Error:", e)
                QtCore.QThread.msleep(100)
        else:
            QtCore.QThread.msleep(100)

def resetall(self):
    self.is_running = False
    self.start.setText("► START")
    self.send_request(f"http://{self.ip_address}/stop")

    self.send_request(f"http://{self.ip_address}/reset")

    self.points1 = []
    self.points2 = []
    self.points3 = []
    self.points4 = []

    self.t_point = []
    self.ex_point = []
    self.ey_point = []
    self.etheta_point = []
    self.vc_point = []
    self.wc_point = []
    self.kx_point = []
    self.ky_point = []
    self.kth_point = []
    self.dhat0_point = []
    self.dhat1_point = []

    # ===== Fuzzy =====
    self.Kx_f_point = []
    self.Ky_f_point = []
    self.Kth_f_point = []

    self.yKx_fz_point = []

```

```

self.yKy_fz_point = []
self.yKth_fz_point = []

self.dxe_fz_point = []
self.dye_fz_point = []
self.dthe_fz_point = []

# ===== Velocity =====
self.Vcmd_point = []
self.Wcmd_point = []

self.vthuc_point = []
self.wthuc_point = []

# ===== Error =====
self.xe_point = []
self.ye_point = []
self.thetae_point = []

# ===== Sliding Surface =====
self.sv_point = []
self.sw_point = []

# ===== SMC =====
self.dVsmc_point = []
self.dWsmc_point = []

# ===== ESO =====
self.dVeso_point = []
self.dWeso_point = []

self.vhat_eso_point = []
self.what_eso_point = []

self.Dvhat_eso_point = []
self.Dwhat_eso_point = []

self.ev_eso_point = []
self.ew_eso_point = []

# ===== Observer =====
self.dVobs_point = []
self.dWobs_point = []

self.z0_point = []
self.z1_point = []

# ===== Control =====
self.Fcmd_point = []
self.Mcmd_point = []

```

```

# ===== Trajectory =====
self.theta_point = []
self.Thetad_point = []

self.R_point = []
self.omega_point = []
self.alpha_point = []

self.auto_fit_y_2_5 = False

# Reset trail green-tracking
if hasattr(self, "tracker"):
    self.tracker.reset_trail()

# Reset 2
self.ax2.clear()
self.ax2.set_xlim(0, 120)
self.ax2.set_xlabel("Time[s]")
self.ax2.set_ylabel("ex, ey, etheta")
self.ax2.axhline(0, color='black', linewidth=0.5)
self.ax2.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
self.ax2.legend(handles=[
    Line2D([], [], color='green', lw=2, label='ex'),
    Line2D([], [], color='magenta', lw=2, label='ey'),
    Line2D([], [], color='cyan', lw=2, label='etheta')
], loc='upper right')
self.ax2.set_title("",
    fontsize=18.5, fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman', color="#bf0000",
    pad=15, loc='center',
    bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='#cccccc',
        linewidth=1.4, boxstyle='round,pad=0.5'))

# Reset 3
self.ax3.clear()
self.ax3.set_xlim(0, 120)
self.ax3.set_xlabel("Time[s]")
self.ax3.set_ylabel("Vd[m/s], Wd[rad/s]")
self.ax3.axhline(0, color='black', linewidth=0.5)
self.ax3.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
self.ax3.legend(handles=[
    Line2D([], [], color='magenta', lw=2, label='Vd'),
    Line2D([], [], color='blue', lw=2, label='Wd')
], loc='upper right')
self.ax3.set_title("",
    fontsize=18.5, fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman', color="#bf0000",
    pad=15, loc='center',
    bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='#cccccc',
        linewidth=1.4, boxstyle='round,pad=0.4'))

```

```

# Reset KX
self.ax_kx.clear()
self.ax_kx.set_xlim(0, 120)
self.ax_kx.set_xlabel("Time[s]")
self.ax_kx.set_ylabel("Kx")
self.ax_kx.grid(True)

# Reset KY
self.ax_ky.clear()
self.ax_ky.set_xlim(0, 120)
self.ax_ky.set_xlabel("Time[s]")
self.ax_ky.set_ylabel("Ky")
self.ax_ky.grid(True)

# Reset KTH
self.ax_kth.clear()
self.ax_kth.set_xlim(0, 120)
self.ax_kth.set_xlabel("Time[s]")
self.ax_kth.set_ylabel("Kth")
self.ax_kth.grid(True)
# Reset 5
self.ax5.clear()
self.ax5.set_xlim(0, 120)
self.ax5.set_xlabel("Time[s]")
self.ax5.set_ylabel("dhat0, dhat1")
self.ax5.axhline(0, color='black', linewidth=0.5)
self.ax5.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
self.ax5.legend(handles=[
    Line2D([], [], color='orange', lw=2, label='dhat0'),
    Line2D([], [], color='purple', lw=2, label='dhat1')
], loc='upper right')
self.ax5.set_title("",
    fontsize=18.5, fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman', color="#bf0000",
    pad=18, loc='center',
    bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='#cccccc',
        linewidth=1.4, boxstyle='round,pad=0.4'))

for name in [
    "line", "line_kx", "line_ky", "line_kth",
    "line_ex", "line_ey", "line_etheta",
    "line_vc", "line_wc",
    "line_dhat0", "line_dhat1"
]:
    if hasattr(self, name):
        delattr(self, name)

# self.canvas.draw()
self.canvas2.draw()
self.canvas3.draw()
self.canvas_kx.draw()

```

```

self.canvas_ky.draw()
self.canvas_kth.draw()
self.canvas5.draw()

def toggleButton(self):
    if self.is_running:
        self.is_running = False
        self.start.setText("► START")
        self.start.setStyleSheet("""
            QPushButton {
                background-color: #00e676;
                color: white;
                font-weight: bold;
                border-radius: 10px;
            }
            """)
        self.send_request(f"http://{self.ip_address}/stop")
    else:
        self.is_running = True
        self.start.setText("■ STOP")
        self.start.setStyleSheet("""
            QPushButton {
                background-color: #ff1744;
                color: white;
                font-weight: bold;
                border-radius: 10px;
            }
            """)
        if self.is_running:
            self.send_values_to_server()

def toggleButton1(self):
    self.send_values_to_server1()

def stop_update_thread(self):
    self.update_thread_running = False
    if self.update_thread and self.update_thread.is_alive():
        self.update_thread.join()

def retranslateUi(self, MainWindow):
    _translate = QtCore.QCoreApplication.translate
    MainWindow.setWindowTitle(_translate("MainWindow", "Mobile Robot"))
    self.start.setText(_translate("MainWindow", "► START"))
    self.start.setStyleSheet("""
        QPushButton {
            background-color: #00e676;
            color: white;
            font-weight: bold;
            border-radius: 10px;
        }
        """)

```

```

self.reset.setText(_translate("MainWindow", "↺ RESET"))
self.reset.setStyleSheet("""
    QPushButton {
        background-color: #fff176;
        color: black;
        font-weight: bold;
        border-radius: 10px;
    }
    """)

self.reset_view.setText(_translate("MainWindow", "↺ RESET VIEW"))
self.reset_view.setStyleSheet("""
    QPushButton {
        background-color: #b3e5fc;
        color: black;
        font-weight: bold;
        border-radius: 10px;
    }
    """)

class CoordPlotApp(QtWidgets.QMainWindow, Ui_MainWindow):
    ip_address = f'{ip1}.{ip2}.{ip3}.{ip4}'
    url = f'http://{ip_address}:8080'

    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.setupUi(self)

        self.auto_fit_y_2_5 = False

        # ĐỒ THỊ 2
        self.card_plot2 = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
        self.card_plot2.setGeometry(QtCore.QRect(870, 10, 410, 250))
        self.card_plot2.setStyleSheet("""
            QFrame {
                background-color: white;
                border: none;
            }
            """)
        self.plot_widget2 = QtWidgets.QWidget(self.card_plot2)
        self.plot_widget2.setGeometry(QtCore.QRect(0, 10, 420, 270))
        self.figure2 = Figure(figsize=(4.4, 2.2), dpi=65)
        self.canvas2 = FigureCanvas(self.figure2)
        layout2 = QtWidgets.QVBoxLayout(self.plot_widget2)
        layout2.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
        layout2.addWidget(self.canvas2)
        self.ax2 = self.figure2.add_subplot(111)
        self.figure2.tight_layout(rect=[0.09, 0.09, 1.0, 1.0])
        self.ax2.set_xlim(0, 120)
        self.ax2.set_xlabel("Time[s]")

```

```

self.ax2.set_ylabel("ex, ey, etheta")
self.ax2.axhline(0, color='black', linewidth=0.5)
self.ax2.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
legend_elements2 = [
    Line2D([], [], color='green', lw=2, label='ex'),
    Line2D([], [], color='magenta', lw=2, label='ey'),
    Line2D([], [], color='cyan', lw=2, label='etheta')
]
self.ax2.legend(handles=legend_elements2, loc='upper right')
self.figure2.suptitle(
    "Reference and Actual Robot Velocities",
    fontsize=20,
    fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman',
    color="#bf0000",
    y=1
)
self.canvas2.draw()

# ĐỒ THỊ 3
self.card_plot3 = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
self.card_plot3.setGeometry(QtCore.QRect(870, 270, 410, 250))
self.card_plot3.setStyleSheet("""
    QFrame{
        background: white;
        border: none;
    }
""")
self.plot_widget3 = QtWidgets.QWidget(self.card_plot3)
self.plot_widget3.setGeometry(QtCore.QRect(0, 10, 420, 270))
self.figure3 = Figure(figsize=(4.4, 2.2), dpi=65)
self.canvas3 = FigureCanvas(self.figure3)
layout3 = QtWidgets.QVBoxLayout(self.plot_widget3)
layout3.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
layout3.addWidget(self.canvas3)
self.ax3 = self.figure3.add_subplot(111)
self.figure3.tight_layout(rect=[0.09, 0.09, 1.0, 1.0])

self.ax3.set_xlim(0, 120)
self.ax3.axhline(0, color='black', linewidth=0.5)
self.ax3.set_xlabel('Time[s]')
self.ax3.set_ylabel('Vd[m/s], Wd[rad/s]')
self.ax3.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
legend_elements3 = [
    Line2D([], [], color='magenta', lw=2, label='Vd'),
    Line2D([], [], color='blue', lw=2, label='Wd')
]
self.ax3.legend(handles=legend_elements3, loc='upper right')
self.figure3.suptitle(
    "Linear and Angular Control Velocities",
    fontsize=20,

```

```

        fontweight='bold',
        fontfamily='Times New Roman',
        color="#bf0000",
        y=1
    )
    self.canvas3.draw()

# ===== KX =====
self.card_kx = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
self.card_kx.setGeometry(QtCore.QRect(180, 0, 220, 130))
self.card_kx.setStyleSheet("""
    QFrame{
        background: transparent;
        border: none;
    }
    """)

self.plot_widget_kx = QtWidgets.QWidget(self.card_kx)
self.plot_widget_kx.setGeometry(QtCore.QRect(10, 10, 200, 100))

self.figure_kx = Figure(figsize=(3.8, 1.8), dpi=60)
self.canvas_kx = FigureCanvas(self.figure_kx)

layout_kx = QtWidgets.QVBoxLayout(self.plot_widget_kx)
layout_kx.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
layout_kx.addWidget(self.canvas_kx)

self.ax_kx = self.figure_kx.add_subplot(111)
self.figure_kx.tight_layout(rect=[0.09, 0.09, 1.0, 0.9])

self.ax_kx.set_xlim(0, 120)
self.ax_kx.set_xlabel("Time[s]")
self.ax_kx.set_ylabel("Kx")
self.ax_kx.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
legend_elements_kx = [Line2D([], [], color='lime', lw=2, label='Kx')]
self.ax_kx.legend(handles=legend_elements_kx, loc='upper right')
self.figure_kx.suptitle(
    "Kx",
    fontsize=20,
    fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman',
    color="#bf0000",
    y=1
)

self.line_kx, = self.ax_kx.plot([], [], color='lime', linewidth=2)

self.canvas_kx.draw()

# ===== KY =====
self.card_ky = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)

```

```

self.card_ky.setGeometry(QtCore.QRect(410, 0, 220, 130))
self.card_ky.setStyleSheet("""
    QFrame{
        background: transparent;
        border: none;
    }
    """)
self.plot_widget_ky = QtWidgets.QWidget(self.card_ky)
self.plot_widget_ky.setGeometry(QtCore.QRect(10, 10, 200, 100))

self.figure_ky = Figure(figsize=(3.8, 1.8), dpi=60)
self.canvas_ky = FigureCanvas(self.figure_ky)

layout_ky = QtWidgets.QVBoxLayout(self.plot_widget_ky)
layout_ky.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
layout_ky.addWidget(self.canvas_ky)

self.ax_ky = self.figure_ky.add_subplot(111)
self.figure_ky.tight_layout(rect=[0.09, 0.09, 1.0, 0.9])

self.ax_ky.set_xlim(0, 120)
self.ax_ky.set_xlabel("Time[s]")
self.ax_ky.set_ylabel("Ky")
self.ax_ky.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
legend_elements_ky = [Line2D([], [], color='blue', lw=2, label='Ky')]
self.ax_ky.legend(handles=legend_elements_ky, loc='upper right')
self.figure_ky.suptitle(
    "Ky",
    fontsize=20,
    fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman',
    color="#bf0000",
    y=1
)

self.line_ky, = self.ax_ky.plot([], [], color='blue', linewidth=2)

self.canvas_ky.draw()

# ===== KTH =====
self.card_kth = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
self.card_kth.setGeometry(QtCore.QRect(640, 0, 220, 130))
self.card_kth.setStyleSheet("""
    QFrame{
        background: transparent;
        border: none;
    }
    """)
self.plot_widget_kth = QtWidgets.QWidget(self.card_kth)
self.plot_widget_kth.setGeometry(QtCore.QRect(10, 10, 200, 100))

```

```

self.figure_kth = Figure(figsize=(3.8, 1.8), dpi=60)
self.canvas_kth = FigureCanvas(self.figure_kth)

layout_kth = QtWidgets.QVBoxLayout(self.plot_widget_kth)
layout_kth.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
layout_kth.addWidget(self.canvas_kth)

self.ax_kth = self.figure_kth.add_subplot(111)
self.figure_kth.tight_layout(rect=[0.09, 0.09, 1.0, 0.9])

self.ax_kth.set_xlim(0, 120)
self.ax_kth.set_xlabel("Time[s]")
self.ax_kth.set_ylabel("Kth")
self.ax_kth.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
legend_elements_kth = [Line2D([], [], color='red', lw=2, label='Kth')]
self.ax_kth.legend(handles=legend_elements_kth, loc='upper right')
self.figure_kth.suptitle(
    "Kth",
    fontsize=20,
    fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman',
    color="#bf0000",
    y=1
)

self.line_kth, = self.ax_kth.plot([], [], color='red', linewidth=2)

self.canvas_kth.draw()

# ĐỒ THỊ 5
self.card_plot5 = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
self.card_plot5.setGeometry(QtCore.QRect(870, 530, 410, 250))
self.card_plot5.setStyleSheet("""
    QFrame{
        background: white;
        border: none;
    }
""")
self.plot_widget5 = QtWidgets.QWidget(self.card_plot5)
self.plot_widget5.setGeometry(QtCore.QRect(0, 10, 420, 270))
self.figure5 = Figure(figsize=(4.4, 2.2), dpi=65)
self.canvas5 = FigureCanvas(self.figure5)
layout5 = QtWidgets.QVBoxLayout(self.plot_widget5)
layout5.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)
layout5.addWidget(self.canvas5)
self.ax5 = self.figure5.add_subplot(111)
self.figure5.tight_layout(rect=[0.09, 0.09, 1.0, 1.0])
self.ax5.set_xlim(0, 120)
self.ax5.axhline(0, color='black', linewidth=0.5)
self.ax5.set_xlabel("Time [s]")
self.ax5.set_ylabel('dhat0, dhat1')

```

```

self.ax5.grid(True, linestyle='--', linewidth=0.5, alpha=0.5)
legend_elements5 = [
    Line2D([], [], color='orange', lw=2, label='dhat0'),
    Line2D([], [], color='purple', lw=2, label='dhat1')
]
self.ax5.legend(handles=legend_elements5, loc='upper right')
self.figure5.suptitle(
    "Fault Estimation",
    fontsize=20,
    fontweight='bold',
    fontfamily='Times New Roman',
    color="#bf0000",
    y=1
)
self.canvas5.draw()

# Connect scroll
# self.canvas.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll)
self.canvas2.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll2)
self.canvas3.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll3)
self.canvas_kx.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll_kx)
self.canvas_ky.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll_ky)
self.canvas_kth.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll_kth)
self.canvas5.mpl_connect('scroll_event', self.on_scroll5)

# Data lists
self.x_values = []
self.y_values = []
self.x_values1 = []
self.y_values1 = []
self.x_values2 = []
self.y_values2 = []
self.x_values3 = []
self.y_values3 = []
self.ex_point = []
self.ey_point = []
self.etheta_point = []
self.t_point = []
self.vc_point = []
self.wc_point = []
self.kx_point = []
self.ky_point = []
self.kth_point = []
self.xw_point = []
self.yw_point = []
self.dhat0_point = []
self.dhat1_point = []

# ===== Fuzzy =====
self.Kx_f_point = []
self.Ky_f_point = []

```

```

self.Kth_f_point = []

self.yKx_fz_point = []
self.yKy_fz_point = []
self.yKth_fz_point = []

self.dxe_fz_point = []
self.dye_fz_point = []
self.dthe_fz_point = []

# ===== Velocity =====
self.Vcmd_point = []
self.Wcmd_point = []

self.vthuc_point = []
self.wthuc_point = []

# ===== Error =====
self.xe_point = []
self.ye_point = []
self.thetae_point = []

# ===== Sliding Surface =====
self.sv_point = []
self.sw_point = []

# ===== SMC =====
self.dVsmc_point = []
self.dWsmc_point = []

# ===== ESO =====
self.dVeso_point = []
self.dWeso_point = []

self.vhat_eso_point = []
self.what_eso_point = []

self.Dvhat_eso_point = []
self.Dwhat_eso_point = []

self.ev_eso_point = []
self.ew_eso_point = []

# ===== Observer =====
self.dVobs_point = []
self.dWobs_point = []

self.z0_point = []
self.z1_point = []

# ===== Control =====

```

```

self.Fcmd_point = []
self.Mcmd_point = []

# ===== Trajectory =====
self.theta_point = []
self.Thetad_point = []

self.R_point = []
self.omega_point = []
self.alpha_point = []

# Card CAMERA
self.card_camera = QtWidgets.QFrame(self.centralwidget)
self.card_camera.setGeometry(QtCore.QRect(10, 120, 850, 660))
self.card_camera.setStyleSheet("""
    QFrame {
        background-color: white;
        border: none;
    }
""")
self.title_cam = QtWidgets.QLabel(self.card_camera)
self.title_cam.setGeometry(QtCore.QRect(10, 5, 850, 30))
self.title_cam.setText("Visual Feedback of FBO-SMCPI")
self.title_cam.setStyleSheet("""
    font-size: 22px;
    font-weight: bold;
    color: #bf0000;
    font-family: 'Times New Roman';
""")
self.title_cam.setAlignment(QtCore.Qt.AlignmentFlag.AlignCenter)

self.camera_label = QtWidgets.QLabel(self.card_camera)
self.camera_label.setGeometry(QtCore.QRect(10, 40, 830, 610))
self.camera_label.setStyleSheet("""
    background-color: black;
    border: none;
""")
self.camera_label.setScaledContents(True)

self.cap = cv2.VideoCapture(1, cv2.CAP_DSHOW)
if not self.cap.isOpened():
    print(" Không thể mở camera máy tính!")

# Green tracking
self.tracker = GreenTracker()

self.timer = QtCore.QTimer()
self.timer.timeout.connect(self.update_camera_frame)
self.timer.start(30)

# self.btn_toggle_cam = QtWidgets.QPushButton(self.centralwidget)

```

```

# self.btn_toggle_cam.setGeometry(QtCore.QRect(770, 600, 150, 31))
# self.btn_toggle_cam.setText("Turn Camera Off")

self.btn_toggle_cam.setCursor(QtGui.QCursor(QtCore.Qt.CursorShape.PointingHandCursor))

def reset_view_axes(self):
    self.auto_fit_y_2_5 = True
    self._auto_fit_y_2_5_now()

def _auto_fit_y_2_5_now(self):
    if not hasattr(self, "t_point") or len(self.t_point) < 2:
        return

    xs = np.array(self.t_point)

    def fit_axis(ax, canvas, series_names):
        cur_xmin, cur_xmax = ax.get_xlim()
        ymins, ymaxs = [], []

        for name in series_names:
            if hasattr(self, name):
                ys = np.array(getattr(self, name))
                mask = (xs >= cur_xmin) & (xs <= cur_xmax)
                if np.any(mask):
                    ymins.append(float(np.min(ys[mask])))
                    ymaxs.append(float(np.max(ys[mask])))

        if ymins and ymaxs:
            ymin, ymax = min(ymins), max(ymaxs)
            ypad = (ymax - ymin) * 0.05 if ymax != ymin else 1.0
            ax.set_ylim(ymin - ypad, ymax + ypad)

        canvas.draw()

    fit_axis(self.ax2, self.canvas2, ["ex_point", "ey_point", "etheta_point"])
    fit_axis(self.ax3, self.canvas3, ["vc_point", "wc_point"])
    fit_axis(self.ax_kx, self.canvas_kx, ["kx_point"])
    fit_axis(self.ax_ky, self.canvas_ky, ["ky_point"])
    fit_axis(self.ax_kth, self.canvas_kth, ["kth_point"])
    fit_axis(self.ax5, self.canvas5, ["dhat0_point", "dhat1_point"])

# Camera update with green tracking
def update_camera_frame(self):
    ret, frame = self.cap.read()
    if not ret:
        return
    # (1) tracking green trên BGR frame
    frame, center, radius = self.tracker.process(frame, flip=True)

    # (tùy chọn) hiện tọa độ lên khung

```

```

if center is not None:
    cv2.putText(
        frame, f"Center: {center}",
        (10, 30),
        cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
        0.5, (255, 255, 255), 1
    )

# (2) convert RGB cho PyQt
frame_rgb = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2RGB)
h, w, ch = frame_rgb.shape
bytes_per_line = ch * w
qimg = QtGui.QImage(
    frame_rgb.data, w, h, bytes_per_line,
    QtGui.QImage.Format.Format_RGB888
)
self.camera_label.setPixmap(QtGui.QPixmap.fromImage(qimg))

def toggle_camera(self):
    if self.timer.isActive():
        self.timer.stop()
        self.btn_toggle_cam.setText("OFF CAMERA")
        self.btn_toggle_cam.setStyleSheet("""
            QPushButton {
                background-color: #ff1744;
                color: white;
                font-weight: bold;
                border-radius: 10px;
            }
            """)
        self.camera_label.clear()
        self.camera_label.setStyleSheet("background-color: black; border: 2px solid gray;")
    else:
        self.timer.start()
        self.btn_toggle_cam.setText("ON CAMERA")
        self.btn_toggle_cam.setStyleSheet("""
            QPushButton {
                background-color: #00e676;
                color: white;
                font-weight: bold;
                border-radius: 10px;
            }
            """)

def closeEvent(self, event):
    if hasattr(self, 'cap') and self.cap.isOpened():
        self.cap.release()
    event.accept()

def update_ui_with_data(self, data):
    try:

```

```

vdat = data["Vc"]
wdat = data["Wc"]

# ===== Fuzzy Gain =====
Kx_f = float(data["Kx_f"])
Ky_f = float(data["Ky_f"])
Kth_f = float(data["Kth_f"])

# ===== Robot State =====
theta = float(data["theta"])
Thetad = float(data["Thetad"])

xe = float(data["xe"])
ye = float(data["ye"])
thetae = float(data["thetae"])

# ===== Velocity =====
Vcmd = float(data["Vcmd"])
Wcmd = float(data["Wcmd"])

vthuc = float(data["vthuc"])
wthuc = float(data["wthuc"])

# ===== Sliding Surface =====
sv = float(data["sv"])
sw = float(data["sw"])

# ===== SMC =====
dVsmc = float(data["dVsmc"])
dWsmc = float(data["dWsmc"])

# ===== ESO =====
dVeso = float(data["dVeso"])
dWeso = float(data["dWeso"])

vhat_eso = float(data["vhat_eso"])
what_eso = float(data["what_eso"])

Dvhat_eso = float(data["Dvhat_eso"])
Dwhat_eso = float(data["Dwhat_eso"])

ev_eso = float(data["ev_eso"])
ew_eso = float(data["ew_eso"])

# ===== Observer =====
dVobs = float(data["dVobs"])
dWobs = float(data["dWobs"])

z0 = float(data["z0"])
z1 = float(data["z1"])

```

```

# ===== Control =====
Fcmd = float(data["Fcmd"])
Mcmd = float(data["Mcmd"])

# ===== Trajectory =====
R = float(data["R"])
omega = float(data["omega"])
alpha = float(data["alpha"])
yKx_fz = float(data["yKx_fz"])
yKy_fz = float(data["yKy_fz"])
yKth_fz = float(data["yKth_fz"])

dx_fz = float(data["dx_fz"])
dy_fz = float(data["dy_fz"])
dth_fz = float(data["dth_fz"])

# toadox = float(data["toadox"])
# toadoy = float(data["toadoy"])
xdat = float(data["xdat"])
ydat = float(data["ydat"])
ex = float(data["ex"])
ey = float(data["ey"])
etheta = float(data["etheta"])
dhat0 = float(data["dhat0"])
dhat1 = float(data["dhat1"])
t = float(data["t"])
kx = float(data["Kx"])
ky = float(data["Ky"])
kth = float(data["Kth"])

if ex > 20:
    kx = float(data["Kx"]) + 0.1
if ex > 4:
    kx = float(data["Kx"]) + 0.05
if ey > 10:
    ky = float(data["Ky"]) - 0.2
if ey > 4:
    ky = float(data["Ky"]) - 0.2
if etheta > 0.3:
    kth = float(data["Kth"]) - 0.01

self.dhat0_point.append(dhat0)
self.dhat1_point.append(dhat1)
self.kx_point.append(kx)
self.ky_point.append(ky)
self.kth_point.append(kth)
self.t_point.append(t)
self.ex_point.append(ex)
self.ey_point.append(ey)
self.etheta_point.append(etheta)
self.vc_point.append(vdat)

```

```

self.wc_point.append(wdat)

# ===== Fuzzy =====
self.Kx_f_point.append(Kx_f)
self.Ky_f_point.append(Ky_f)
self.Kth_f_point.append(Kth_f)

self.yKx_fz_point.append(ykx_fz)
self.yKy_fz_point.append(yky_fz)
self.yKth_fz_point.append(ykth_fz)

self.dxe_fz_point.append(dxe_fz)
self.dye_fz_point.append(dye_fz)
self.dthe_fz_point.append(dthe_fz)

# ===== Velocity =====
self.Vcmd_point.append(Vcmd)
self.Wcmd_point.append(Wcmd)

self.vthuc_point.append(vthuc)
self.wthuc_point.append(wthuc)

# ===== Error =====
self.xe_point.append(xe)
self.ye_point.append(ye)
self.thetae_point.append(thetae)

# ===== Sliding Surface =====
self.sv_point.append(sv)
self.sw_point.append(sw)

# ===== SMC =====
self.dVsmc_point.append(dVsmc)
self.dWsmc_point.append(dWsmc)

# ===== ESO =====
self.dVeso_point.append(dVeso)
self.dWeso_point.append(dWeso)

self.vhat_eso_point.append(vhat_eso)
self.what_eso_point.append(what_eso)

self.Dvhat_eso_point.append(Dvhat_eso)
self.Dwhat_eso_point.append(Dwhat_eso)

self.ev_eso_point.append(ev_eso)
self.ew_eso_point.append(ew_eso)

# ===== Observer =====
self.dVobs_point.append(dVobs)
self.dWobs_point.append(dWobs)

```

```

self.z0_point.append(z0)
self.z1_point.append(z1)

# ===== Control =====
self.Fcmd_point.append(Fcmd)
self.Mcmd_point.append(Mcmd)

# ===== Trajectory =====
self.theta_point.append(theta)
self.Thetad_point.append(Thetad)

self.R_point.append(R)
self.omega_point.append(omega)
self.alpha_point.append(alpha)

self.safe_remove("line")

# self.points2.append((xdat, ydat))
# x_values2, y_values2 = zip(*self.points2)
# self.line, = self.ax.plot(x_values2, y_values2, 'b-')

# self.points1.append((toadox, toadoy))
# x_values1, y_values1 = zip(*self.points1)
# self.line, = self.ax.plot(x_values1, y_values1, 'r-')

current_xlim = self.ax2.get_xlim()
if t >= current_xlim[1]:
    new_xlim = (current_xlim[1], current_xlim[1] + 120)
    self.ax2.set_xlim(new_xlim)

current_xlim2 = self.ax3.get_xlim()
if t >= current_xlim2[1]:
    new_xlim2 = (current_xlim2[1], current_xlim2[1] + 120)
    self.ax3.set_xlim(new_xlim2)

# ===== KX =====
current_xlim_kx = self.ax_kx.get_xlim()
if t >= current_xlim_kx[1]:
    self.ax_kx.set_xlim(current_xlim_kx[1], current_xlim_kx[1] + 120)

# ===== KY =====
current_xlim_ky = self.ax_ky.get_xlim()
if t >= current_xlim_ky[1]:
    self.ax_ky.set_xlim(current_xlim_ky[1], current_xlim_ky[1] + 120)

# ===== KTH =====
current_xlim_kth = self.ax_kth.get_xlim()
if t >= current_xlim_kth[1]:
    self.ax_kth.set_xlim(current_xlim_kth[1], current_xlim_kth[1] + 120)

```

```

current_xlim5 = self.ax5.get_xlim()
if t >= current_xlim5[1]:
    new_xlim5 = (current_xlim5[1], current_xlim5[1] + 120)
    self.ax5.set_xlim(new_xlim5)

# ===== KX =====
self.safe_remove("line_kx")
self.line_kx, = self.ax_kx.plot(
    self.t_point,
    self.kx_point,
    color='lime'
)

# ===== KY =====
self.safe_remove("line_ky")
self.line_ky, = self.ax_ky.plot(
    self.t_point,
    self.ky_point,
    color='blue'
)

# ===== KTH =====
self.safe_remove("line_kth")
self.line_kth, = self.ax_kth.plot(
    self.t_point,
    self.kth_point,
    color='red'
)

self.safe_remove("line_ex")
self.line_ex, = self.ax2.plot(self.t_point, self.ex_point, 'g-')

self.safe_remove("line_ey")
self.line_ey, = self.ax2.plot(self.t_point, self.ey_point, 'm-')

self.safe_remove("line_etheta")
self.line_etheta, = self.ax2.plot(self.t_point, self.etheta_point, 'c-')

self.safe_remove("line_vc")
self.line_vc, = self.ax3.plot(self.t_point, self.vc_point, 'magenta')

self.safe_remove("line_wc")
self.line_wc, = self.ax3.plot(self.t_point, self.wc_point, 'b-')

self.safe_remove("line_dhat0")
self.line_dhat0, = self.ax5.plot(self.t_point, self.dhat0_point, 'orange')

self.safe_remove("line_dhat1")
self.line_dhat1, = self.ax5.plot(self.t_point, self.dhat1_point, 'purple')

# self.canvas.draw()

```

```

self.canvas2.draw()
self.canvas3.draw()
self.canvas_kx.draw()
self.canvas_ky.draw()
self.canvas_kth.draw()
self.canvas5.draw()

if getattr(self, "auto_fit_y_2_5", False):
    self._auto_fit_y_2_5_now()

except KeyError as e:
    print("Missing key in response data:", e)

def on_scroll2(self, event):
    if event.inaxes == self.ax2:
        self.auto_fit_y_2_5 = False
        factor = 1.5
        ylim2 = self.ax2.get_ylim()

        if event.button == 'up':
            new_ylim2 = (ylim2[0] * factor, ylim2[1] * factor)
        elif event.button == 'down':
            new_ylim2 = (ylim2[0] / factor, ylim2[1] / factor)

        self.ax2.set_ylim(new_ylim2)
        self.canvas2.draw()

def on_scroll3(self, event):
    if event.inaxes == self.ax3:
        self.auto_fit_y_2_5 = False
        factor = 1.5
        ylim3 = self.ax3.get_ylim()

        if event.button == 'up':
            new_ylim3 = (ylim3[0] * factor, ylim3[1] * factor)
        elif event.button == 'down':
            new_ylim3 = (ylim3[0] / factor, ylim3[1] / factor)

        self.ax3.set_ylim(new_ylim3)
        self.canvas3.draw()

def on_scroll_kx(self, event):
    if event.inaxes == self.ax_kx:
        factor = 1.5
        ylim = self.ax_kx.get_ylim()

        if event.button == 'up':
            new_ylim = (ylim[0] * factor, ylim[1] * factor)
        else:
            new_ylim = (ylim[0] / factor, ylim[1] / factor)

```

```

self.ax_kx.set_ylim(new_ylim)
self.canvas_kx.draw()

def on_scroll_ky(self, event):
    if event.inaxes == self.ax_ky:
        factor = 1.5
        ylim = self.ax_ky.get_ylim()

        if event.button == 'up':
            new_ylim = (ylim[0] * factor, ylim[1] * factor)
        else:
            new_ylim = (ylim[0] / factor, ylim[1] / factor)

        self.ax_ky.set_ylim(new_ylim)
        self.canvas_ky.draw()

def on_scroll_kth(self, event):
    if event.inaxes == self.ax_kth:
        factor = 1.5
        ylim = self.ax_kth.get_ylim()

        if event.button == 'up':
            new_ylim = (ylim[0] * factor, ylim[1] * factor)
        else:
            new_ylim = (ylim[0] / factor, ylim[1] / factor)

        self.ax_kth.set_ylim(new_ylim)
        self.canvas_kth.draw()

def on_scroll5(self, event):
    if event.inaxes == self.ax5:
        self.auto_fit_y_2_5 = False
        factor = 1.5
        ylim5 = self.ax5.get_ylim()

        if event.button == 'up':
            new_ylim5 = (ylim5[0] * factor, ylim5[1] * factor)
        elif event.button == 'down':
            new_ylim5 = (ylim5[0] / factor, ylim5[1] / factor)

        self.ax5.set_ylim(new_ylim5)
        self.canvas5.draw()

def send_request(self, url):
    try:
        response = requests.get(url)
        if response.status_code != 200:
            print(f"Failed to send request. Status code: {response.status_code}")
    except Exception as e:
        print("Error sending request:", e)

```

```

def send_values_to_server(self):
    if self.is_running:
        url = f"http://{self.ip_address}/start?"
        self.send_request(url)

def send_values_to_server1(self):
    bankinh_value = self.so_ban_kinh.text()
    omega_value = self.so_goc.text()
    ktheta_value = self.ktheta.text()
    kx_value = self.kx.text()
    ky_value = self.ky.text()

    url =
f"http://{self.ip_address}/continuee?bankinh={bankinh_value}&omega={omega_value}&
kx={kx_value}&ky={ky_value}&ktheta={ktheta_value}"
    self.send_request(url)

if __name__ == '__main__':
    app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
    window = CoordPlotApp()
    window.show()
    app.aboutToQuit.connect(window.stop_update_thread)
    sys.exit(app.exec())

```

Số 718 - QĐ/HVKHCN

Hà Nội, ngày 13 tháng 8 năm 2026

QUYẾT ĐỊNH
thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện

-
- Căn cứ Quyết định số 175-QĐ/VHLKHCNVN ngày 28/04/2026 của Chủ tịch Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam ban hành Quy chế Tổ chức và hoạt động của Học viện Khoa học và Công nghệ;
 - Căn cứ Thông tư số 18/2021/TT-BGDĐT ngày 28/06/2021 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;
 - Căn cứ Quyết định số 1968/QĐ-HVKHCN ngày 28/12/2021 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;
 - Căn cứ Quyết định số 1989/QĐ-HVKHCN ngày 30/11/2022 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc công nhận nghiên cứu sinh đợt 2 năm 2022;
 - Xét đề nghị của Trưởng phòng Đào tạo.

GIÁM ĐỐC HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
QUYẾT ĐỊNH

Điều 1. Thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện cho nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương với đề tài:

Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa Mã số: 9 52 02 16

Danh sách thành viên Hội đồng đánh giá luận án kèm theo Quyết định này.

Điều 2. Hội đồng có trách nhiệm đánh giá luận án tiến sĩ theo đúng quy chế hiện hành của Bộ Giáo dục và Đào tạo, của Học viện Khoa học và Công nghệ. Quyết định có hiệu lực đến ngày 18/10/2026. Hội đồng tự giải thể sau khi hoàn thành nhiệm vụ.

Điều 3. Trưởng phòng Tổ chức - Hành chính, Trưởng phòng Đào tạo, Trưởng phòng Kế toán, các thành viên có tên trong danh sách Hội đồng và nghiên cứu sinh có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành Quyết định này. *Đu*

Nơi nhận:

- Như Điều 3;
- Lưu hồ sơ NCS;
- Lưu: VT, ĐT, PQ.15.



PGS. TS. Hoàng Anh Sơn



DANH SÁCH HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

(Kèm theo Quyết định số 118 - QĐ/HVKHCN ngày 13/8/2026
của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ)

Nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn chính: TS. Ngô Mạnh Tiến, Viện Vật lý,

Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn phụ: TS. Ngô Duy Tân, Trung tâm Vũ trụ Việt Nam,

Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

TT	Họ và tên, học hàm, học vị	Ngành	Cơ quan công tác	Trách nhiệm trong Hội đồng
1	GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh	Cơ học	Viện Cơ học, Viện Hàn lâm KHCN VN	Chủ tịch
2	PGS. TS. Nguyễn Hoài Nam	Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa	Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội	Phản biện 1
3	TS. Bùi Thị Thanh Quyên	Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa	Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm KHCN VN	Phản biện 2
4	TS. Đỗ Quang Hiệp	Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa	Trường Đại học Kinh Tế - Kỹ thuật Công nghiệp	Ủy viên - Thư ký
5	PGS. TS. Hoàng Văn Xiêm	Kỹ thuật điện và máy tính	Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội	Ủy viên
6	PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh	Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa	Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự	Ủy viên
7	PGS.TS. Trương Xuân Tùng	Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa	Học Viện Kỹ thuật Quân sự	Ủy viên

Hội đồng gồm 07 thành viên.

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Tên đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Họ và Tên nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Người nhận xét: GS.TKH. Nguyễn Đông Anh

Cơ quan công tác: Viện Cơ học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Trong robot di động, lỗi cơ cấu chấp hành tác động trực tiếp đến khả năng sinh vận tốc và điều hướng. Khi lỗi xảy ra đồng thời với nhiễu, bất định mô hình và hiện tượng trượt bánh, chất lượng bám quỹ đạo có thể suy giảm đáng kể. Luận án nghiên cứu bài toán quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng làm việc an toàn của các hệ robot tự hành. Đề tài có tính thời sự, có ý nghĩa khoa học.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

- Qua nội dung luận án và hệ thống tài liệu tham khảo, tôi không nhận thấy sự trùng lặp về các kết quả chính với các công trình đã công bố.

- Các lý thuyết nền tảng được sử dụng trong luận án như mô hình hóa robot di động, lý thuyết ổn định Lyapunov, điều khiển trượt, bộ quan sát trạng thái và bộ quan sát nhiễu đều là các kết quả đã được biết. Tuy nhiên, nghiên cứu sinh đã khai

thác và phát triển chúng theo hướng riêng cho bài toán quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi của NWMR.

- So với bản ở giai đoạn phản biện độc lập, phần tổng quan và trích dẫn trong bản hiện tại đã được hoàn thiện hơn, làm rõ hơn cơ sở kế thừa và phân phát triển của luận án.

- Tài liệu được trích dẫn tương đối đầy đủ và đáp ứng yêu cầu của một luận án tiến sĩ.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài phản ánh đúng nội dung nghiên cứu. Nội dung luận án về lĩnh vực điều khiển hệ phi tuyến, quan sát trạng thái và điều khiển chịu lỗi, phù hợp với ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, mã số 9 52 02 16.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Phương pháp sử dụng trong luận án là phương pháp suy luận logic của lý thuyết điều khiển, nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng số để kiểm chứng độ tin cậy. Các tiếp cận phù hợp với nội dung luận án và có tính hiện đại..

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

- Đã đề xuất cấu trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng dựa trên bộ quan sát lỗi cho robot di động non-holonomic. Thông tin lỗi được ước lượng và đưa vào luật điều khiển nhằm nâng cao khả năng bù lỗi và duy trì chất lượng bám quỹ đạo.

- Đã đề xuất phương pháp điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu cải tiến và ràng buộc hiệu năng định trước. Cách tiếp cận này cho phép xem xét đồng thời yêu cầu ổn định, khả năng chống nhiễu/lỗi và chất lượng quá độ của sai số bám.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án

Luận án có khối lượng nghiên cứu tương đối lớn, trình bày có tính hệ thống từ xây dựng mô hình, thiết kế bộ quan sát đến tổng hợp các luật điều khiển chịu lỗi. Một số vấn đề phản ánh thực tế sử dụng như ảnh hưởng của các robot khác, nhiễu môi trường

còn chưa được xét chi tiết. Đây là những góp ý nghiên cứu sau tiến sĩ, không ảnh hưởng đến các kết quả và đóng góp khoa học của luận án.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố

Nghiên cứu sinh có 09 công trình khoa học liên quan đến hướng nghiên cứu của luận án, gồm các công trình hội nghị quốc tế, tạp chí thuộc Scopus và các bài báo thuộc hệ thống SCIE. Nội dung các công bố phản ánh được nội dung cơ bản của luận án.

8. Kết luận chung

Luận án là một công trình nghiên cứu được thực hiện nghiêm túc đáp ứng các yêu cầu của Bộ Giáo dục và Đào tạo. Bản tóm tắt luận án về cơ bản phản ánh trung thành các nội dung và kết quả nghiên cứu chính. Tôi đồng ý đề nghị cho nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương được bảo vệ luận án trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện để xem xét công nhận học vị Tiến sĩ.

Hà nội, ngày 4 tháng 09 năm 2026

Người nhận xét



GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9520216

Tên nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Người hướng dẫn:

1. TS. Ngô Mạnh Tiến – Viện Vật lý, viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam
2. TS. Ngô Duy Tân – Trung tâm Vũ trụ Việt Nam, viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người nhận xét: PGS. TS. Nguyễn Hoài Nam

Cơ quan công tác: Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Trong quá trình làm việc, cơ cấu chấp hành có thể bị lỗi do nhiều nguyên nhân khác nhau. Điều này làm thay đổi tín hiệu điều khiển mong muốn, ảnh hưởng đến chất lượng đầu của của xe. Bên cạnh đó, trong quá trình làm việc, xe còn chịu tác động bởi nhiễu đo lường, tác động từ môi trường bên ngoài do ma sát bề mặt, do bất định mô hình. Do đó, đề tài luận án tập trung vào giải quyết vấn đề lỗi cơ cấu chấp hành trong quá trình thiết kế bộ điều khiển có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, rất cần thiết và có tính thời sự.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Đề tài không trùng lặp với các công bố trong và ngoài nước. Các tài liệu tham khảo được trích dẫn rõ ràng và đầy đủ. Tuy nhiên, các tài liệu tham khảo công bố trong năm 2026 còn rất hạn chế.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài phù hợp với nội dung của luận án.

Nội dung luận án phù hợp với ngành và mã số ngành.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Nghiên cứu sinh đã sử dụng các phương pháp nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng, thực nghiệm và so sánh để đánh giá bộ điều khiển đề xuất. Thể hiện độ tin cậy và tính hiện đại.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Luận án có những đóng góp như sau:

- a) Bộ điều khiển chịu lỗi sử dụng bộ quan sát lỗi đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.
- b) Thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án

Còn những thiếu sót và tồn tại cần chỉnh sửa như sau:

- Thống nhất viết “non-holonomic” có gạch ngang hoặc không “nonholonomic”;
- Chưa chuẩn hóa góc ‘theta’ trong danh mục hình ảnh (hình 3.4; hình 3.19; hình 3.24); bảng 4.2;
- Câu văn chưa rõ ràng: “Trong số các loại lỗi, lỗi cơ cấu chấp hành được xem là một trong những tác giả tập trung vào?”
- Nên sử dụng thống nhất các từ ngữ chuyên ngành Việt hóa đối với các thuật ngữ đã được Việt hóa;
- Tiêu đề của các cột nên thống nhất để tên tiếng Việt (hiện tại có bảng đề tiếng Việt, có bảng đề tiếng Anh);
- Chi tiết hơn phần chứng minh Định lý 3.2 khi có ước lượng và bù lỗi cơ cấu chấp hành để sai số bám quỹ đạo đạt ổn định tiệm cận. Trong phần chứng minh không đề cập gì tới ước lượng và bù lỗi.
- Trong các định lý và phần chứng minh, NCS nên trình bày rõ hệ kín là hệ nào (động học/động lực học); có những kết luận dành cho hệ kín nhưng không nêu rõ nên bị kết luận mang tính chất mâu thuẫn.
- Câu văn chưa chính xác “nhiều bên ngoài được suy giảm thông qua thành phần SMC”.
- Hình 3.17 đánh chữ trong ký hiệu index ($I = x, y, \theta$); đánh chữ trong bảng 4.1;
- Hình 4.2 bị mất chữ trong khối Hàm chuyển đổi; thống nhất sử dụng từ tiếng Việt trừ từ viết tắt đã được chú thích;

Handwritten signature

-Viết hóa tên các trục của hình ảnh;

Trích dẫn nguồn [internet] là chưa rõ ràng và đầy đủ thông tin, cần thêm địa chỉ trang web, thời gian truy cập.

Một số cụm từ tiếng anh ở trang 8 nên bỏ đi và trích dẫn tài liệu trực tiếp.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố

Nội dung của luận án đã được công bố trong các tạp chí, hội nghị trong và ngoài nước, trong đó có những tạp chí chuyên ngành uy tín (SCIE/Q2).

- NCS là tác giả chính bao gồm:

+ 03 Kỷ yếu hội thảo quốc tế (Scopus-Q4)

+ 01 Tạp chí quốc tế SCIE-Q1 (IEEE Access-2026)

+ 01 Tạp chí quốc tế Scopus-Q3 (Bulletin of Electrical Engineering and Informatics-2026)

+ 01 Tạp chí quốc tế Scopus-Q2 (J.Robot Control (JRC)-2025)

+ 02 Tạp chí quốc tế SCIE-Q2 (Transactions of the Institute of Measurement and Control -2026; International Journal of Control, Automation, and Systems-2026)

- NCS là đồng tác giả bao gồm:

+ 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế SCIE-Q2 (Int. J. Control Autom. System - 2025)

Các kết quả công bố nêu trên cho thấy nghiên cứu đã đáp ứng được các yêu cầu về công bố khoa học theo quy định hiện hành.

8. Kết luận chung

Luận án đáp ứng yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa. Đồng ý đề nghị nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương được bảo vệ luận án trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện.

Hà nội, ngày 10 tháng 09 năm 2026

Người nhận xét



PGS.TS. Nguyễn Hoài Nam

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ **(Cấp Học viện)**

Tên đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic.

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: **Hồ Sỹ Phương**

Người hướng dẫn 1: TS. Ngô Mạnh Tiến

Người hướng dẫn 2: TS. Ngô Duy Tân

Người nhận xét: *TS. Bùi Thị Thanh Quyên*

Cơ quan công tác của người nhận xét: Viện Công nghệ thông tin, Viện HL KH&CN VN

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Với bài toán bám quỹ đạo cho trước, thiết kế các bộ điều khiển cho robot di động non-holonomic (NWMR) để có khả năng bám quỹ đạo chính xác và đảm bảo ổn định vẫn luôn có những thách thức do luôn tồn tại nhiễu, bất định mô hình, lỗi cơ cấu chấp hành, trượt bánh xe, v.v. Luận án tập trung vào việc xây dựng bộ quan sát lỗi và đề xuất các bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic nhằm đảm bảo robot duy trì được ổn định và hiệu quả bám quỹ đạo khi tồn tại lỗi cơ cấu chấp hành.

Đây là những nghiên cứu có ý nghĩa khoa học, bổ sung làm rõ cơ sở lý thuyết cho bài toán quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR. Nghiên cứu cũng có khả năng ứng dụng thực tiễn, góp phần nâng cao độ tin cậy, tính tự chủ và hiệu quả vận hành robot di động trong lĩnh vực điều khiển bám quỹ đạo.

2. Sự hợp lý và độ tin cậy của các phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu kết hợp giữa phân tích lý thuyết, mô phỏng sử dụng Matlab/Simulink nhằm xây dựng, kiểm chứng và đánh giá hiệu quả của hệ thống quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR.

Các phương pháp đã sử dụng trong luận án để nghiên cứu có tính logic, hợp lý và khá tin cậy.

3. Đánh giá các kết quả đạt được, nêu những đóng góp mới và giá trị của các đóng góp đó:

Kết quả nghiên cứu mới của tác giả như sau:

- + Đề xuất bộ quan sát lỗi và kiến trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng, cho phép ước lượng bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.
- + Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi cho NWMR dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

Luận án cũng đã trình bày chi tiết các kết quả mô phỏng sử dụng Matlab/Simulink, kết quả thực nghiệm sử dụng bộ điều khiển FBO_SMCESO (trình bày trong Chương 3) cho robot bám quỹ đạo hình tròn (Phụ lục 5-8).

Đây là những đóng góp mới và giá trị cho lĩnh vực điều khiển robot di động non-holonomic bám quỹ đạo.

4. Những ưu điểm và thiếu sót, những điểm cần được bổ sung và sửa chữa

Luận án chia làm 04 chương và Phụ lục trong đó:

Chương 1: Tổng quan về quan sát trạng thái, phát hiện lỗi và ĐK chịu lỗi cho robot di động non-holonomic (18 trang).

Chương 2: Phát triển bộ quan sát và phát hiện lỗi cơ cấu chấp hành cho NWMR (24 trang).

Chương 3: Kiến trúc điều khiển chịu lỗi phân tầng dựa trên bộ quan sát cho NWMR (37 trang).

Chương 4: Điều khiển chịu lỗi với ràng buộc hiệu năng cho NWMR (18 trang)

Các đóng góp chính của luận án trình bày ở Chương 2, 3, 4.

Ưu điểm:

Nhìn chung luận án là công trình khoa học nghiêm túc, có ý nghĩa khoa học và khả năng ứng dụng thực tiễn. Các đóng góp của luận án được công bố trong các tạp chí/kỷ yếu hội thảo chuyên ngành có uy tín. Tóm tắt luận án phản ánh đầy đủ, trung thực các kết quả nghiên cứu của luận án.

+ Bố cục, nội dung luận án về cơ bản hợp lý, logic, mạch lạc. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi nghiên cứu khá rõ ràng.

+ Nội dung nghiên cứu được triển khai tương đối hệ thống, từ tổng quan lý thuyết, đề xuất thuật toán, phân tích tính ổn định của hệ thống bằng phương pháp Lyapunov, đến mô phỏng kiểm chứng và đánh giá.

Một số ý kiến chỉnh sửa, bổ sung luận án:

- Một số hình nên được Việt hóa: Hình 2.1, Hình 2.2, Hình 3.1.
- Lỗi đánh máy: trang 53, dòng 4 từ dưới lên.
- Câu chữ lủng củng: trang 8, dòng 18-19 từ trên xuống.

- Từ/cụm từ nên dùng thống nhất xuyên suốt luận án: Trang 81, 83: lỗi cơ cấu chấp hành, lỗi của bộ truyền động.
- Các thông số mô hình robot sử dụng trong mô phỏng, nếu được tham khảo ở tài liệu khác thì nên trích dẫn Ref. đầy đủ.
- Nên giải thích ngay khi biến/hàm xuất hiện lần đầu tiên: $H(\varepsilon^*)$ xuất hiện ở trang 96, sang giữa trang 97 mới giải thích H, ε^* .
- Một số tài liệu tham khảo quốc tế gần giai đoạn 2025–2026 nên được cập nhật thêm (Ref. năm 2025-2026 hiện khá ít).
- Mục 3.1.3 Mô phỏng và đánh giá cho 03 bộ điều khiển: PID, iPID không có FO và MFC-iPID (Bảng 3.1), tuy nhiên chú thích trong Hình 3.3 - 3.8 chưa đồng nhất với tên các bộ ĐK: iPID without FO, PID FO, MFC-iPID FO, PID without FO, Proposed gây khó theo dõi. Tương tự cho Hình 3.20-3.26.
- Trang 58, dòng 3 từ trên xuống: “Trong kịch bản thứ hai, lỗi cơ cấu chấp hành được đưa vào hệ thống tại thời điểm $t = 8s$...đồng thời các tham số của robot như khối lượng m và mô men quán tính I cũng thay đổi 10% theo thời gian”.
Cụm từ “*thay đổi 10% theo thời gian*” chưa thực sự rõ nghĩa, khá mơ hồ. Hãy làm rõ thêm cụm từ này trong phần mô phỏng với $time = 25s$ và chỉnh lại rõ nghĩa hơn.
- Trang 60, NCS viết “Hình 3.8 minh họa vai trò của bộ quan sát lỗi..., với thời điểm phát hiện lỗi vào khoảng 8,007 s tương ứng với độ trễ phát hiện khoảng 0,007 s”. Tuy nhiên dựa vào Hình 3.8 rất khó để nhận ra lỗi cơ cấu chấp hành đưa vào tại thời điểm 8s và 8,007 s thì phát hiện ra lỗi. Cần đưa ra minh chứng cụ thể, trực quan hơn.
- Trang 71, phần giải thích về các Hình nhưng có đề cập thêm các thông số trong Bảng 3.3 và 3.4 thì cần chú giải rõ thông số đó xem trong bảng nào. Ví dụ: “... , thể hiện qua chỉ số ISE (2.13 so với 2.21 của B-SMC)”, thông số 2.13 và 2.21 ở Bảng nào?
- Trang 72: Dòng 3-8 từ trên xuống: thực tế rất khó để nhìn ra “đặc biệt là trên đoạn cong trong khoảng 20-25 giây khi xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành”, “độ lệch ngang cực đại luôn nhỏ hơn 0.1 m” => chỉnh sửa lại cho hợp lý.

Nhìn chung, các nội dung cần chỉnh sửa chủ yếu mang tính hoàn thiện và nâng cao chất lượng trình bày, không ảnh hưởng đến các kết quả khoa học chính của luận án.

Câu hỏi trao đổi:

- 1) Các hàm lập lịch được chọn trong (2.38) có được tham khảo ở tài liệu nào không? Nếu không thì lý do tại sao chọn như vậy?

5. Đánh giá về sự trùng lặp của luận án so với các đồ án, luận văn hay công trình khoa học đã công bố trong và ngoài nước

Theo hiểu biết của người nhận xét, hiện kết quả của luận án không trùng lặp với các luận án, luận văn hay công trình khoa học đã công bố trong và ngoài nước.

6. Nhận xét về chất lượng các bài báo khoa học đã được công bố và khẳng định các bài báo đó chứa đựng nội dung chủ yếu của luận án

Nghiên cứu sinh có **09** công trình khoa học có liên quan đến luận án, trong đó:

- + **04** công trình công bố trên tạp chí SCIE (*IEEE Access; Int. Journal of Control, Automation, and Systems; Trans. of the Institute of Measurement and Control*),
- + **02** công trình công bố trên tạp chí SCOPUS (*Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, Journal of Robotics and Control*),
- + **03** công trình công bố ở hội thảo/hội nghị quốc tế.

Nhìn chung, các bài báo khoa học đã công bố có chất lượng tốt, phù hợp chuyên ngành đào tạo và cơ bản chứa đựng các nội dung nghiên cứu chủ yếu của luận án. Các công bố thể hiện nghiên cứu sinh có khả năng nghiên cứu độc lập, tiếp cận được chuẩn công bố quốc tế và đáp ứng yêu cầu đối với luận án tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa.

7. Tính trung thực trong việc trích dẫn các công trình đã được NCS công bố trong và ngoài nước, tài liệu tham khảo

Các kết quả nghiên cứu của luận án đã được trích dẫn trung thực trong các công trình công bố.

Số lượng tài liệu tham khảo trong luận án là **84**. Trích dẫn tài liệu tham khảo được thực hiện một cách khá rõ ràng, đầy đủ và cập nhật.

8. Kết luận

- Luận án đáp ứng được các yêu cầu về nội dung và hình thức đối với một luận án tiến sĩ, ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa.

- Đồng ý cho NCS được bảo vệ tại Hội đồng chấm luận án cấp Học viện.

Hà Nội, ngày 04 tháng 09 năm 2026

Người nhận xét



TS. Bùi Thị Thanh Quyên

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM**Độc lập - Tự do - Hạnh phúc****BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CẤP HỌC VIỆN**

Tên đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Tên nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Người hướng dẫn:

1. TS. Ngô Mạnh Tiến – Viện Vật lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
2. TS. Ngô Duy Tân – Trung tâm Vũ trụ Việt Nam, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người nhận xét: TS. Đỗ Quang Hiệp

Cơ quan công tác: Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

NỘI DUNG NHẬN XÉT**1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án**

Ngày nay, Robot đang là xu hướng phát triển mạnh mẽ và ứng dụng trong hầu hết các lĩnh vực. Trong đó, Robot di động non-holonomic là đối tượng được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống tự hành, vận chuyển thông minh, logistics và robot dịch vụ. Khi yêu cầu về mức độ tự động hóa và độ tin cậy ngày càng cao, việc đảm bảo khả năng làm việc của robot trong điều kiện có nhiễu, bất định và suy giảm hiệu lực cơ cấu chấp hành trở thành một nội dung có ý nghĩa thực tiễn.

Có thể thấy việc robot gặp lỗi trong quá trình hoạt động là rất phổ biến, đặc biệt lỗi cơ cấu chấp hành có ảnh hưởng trực tiếp đến vận tốc và khả năng điều hướng của robot. Nếu không được phát hiện và bù thích hợp, lỗi có thể làm giảm chất lượng bám quỹ đạo, tăng sai số và ảnh hưởng đến độ ổn định của hệ thống. Do đó, việc kết hợp quan sát lỗi với điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic là một hướng nghiên cứu phù hợp với yêu cầu phát triển các hệ thống robot có tính tự chủ và độ tin cậy cao.

Luận án đã lựa chọn vấn đề nghiên cứu có tính thời sự, phù hợp với ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa. Kết quả nghiên cứu của luận án có ý nghĩa cả về phương pháp luận điều khiển và khả năng phát triển ứng dụng trên các nền tảng robot di động thực tế.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Luận án đã tổng hợp và phân tích khá đầy đủ các nhóm phương pháp liên quan đến điều khiển robot di động, quan sát trạng thái, quan sát lỗi, điều khiển chịu lỗi và điều khiển phi tuyến.

Nghiên cứu sinh đã xác định được hướng nghiên cứu độc lập, tập trung vào việc khai thác thông tin lỗi cơ cấu chấp hành trong thiết kế bộ điều khiển, đồng thời phát triển các cấu trúc điều khiển - quan sát có khả năng xử lý đồng thời lỗi, nhiễu và bất định cho thấy không trùng lặp về nội dung tổng thể và các kết quả chính của luận án với các công trình đã công bố được trích dẫn. Các công trình khoa học của nghiên cứu sinh có mối liên hệ chặt chẽ với từng nội dung nghiên cứu được trình bày trong luận án.

Hệ thống tài liệu tham khảo đáp ứng yêu cầu của một luận án tiến sĩ. Tài liệu tham khảo được trích dẫn rõ ràng. Nghiên cứu sinh nên rà soát kỹ về định dạng tài liệu tham khảo và sự thống nhất trong cách viết tên tạp chí, hội nghị, DOI và các thuật ngữ chuyên ngành trước khi hoàn thiện bản lưu chiếu.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài phản ánh đúng nội dung nghiên cứu của luận án. Đối tượng chính là robot di động non-holonomic; các vấn đề cốt lõi là xây dựng bộ quan sát lỗi và phát triển các chiến lược điều khiển chịu lỗi.

Luận án được trình bày logic từ việc mô hình hóa, quan sát trạng thái và lỗi, phân tích ổn định, thiết kế điều khiển bám quỹ đạo, điều khiển trượt, điều khiển thích nghi, điều khiển phi mô hình và điều khiển với hiệu năng định trước cho thấy các nội dung phù hợp với ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa và mã số đào tạo.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu phù hợp, kết hợp giữa mô hình hóa toán học, thiết kế bộ quan sát, tổng hợp luật điều khiển, phân tích ổn định và kiểm chứng bằng mô phỏng số.

Nghiên cứu sinh đã khai thác nhiều kỹ thuật điều khiển hiện đại như bộ quan sát trạng thái mở rộng, bộ quan sát độ lợi cao, bộ quan sát lỗi, bộ quan sát nhiễu, điều khiển trượt, điều khiển thích nghi và điều khiển với hiệu năng định trước. Các phương pháp này được tích hợp theo từng cấu trúc cụ thể thay vì chỉ được trình bày riêng lẻ.

Người nhận xét ghi nhận luận án của NCS Hồ Sỹ Phương có sự phát triển theo mức độ phức tạp của bài toán. Từ việc nghiên cứu quan sát và bù lỗi cơ cấu chấp hành, luận án chuyển sang các cấu trúc điều khiển hai vòng, sau đó xem xét thêm ảnh hưởng của nhiễu, trượt bánh và thay đổi vị trí trọng tâm.

Các kết quả đánh giá tính ổn định và hội tụ của các thuật toán chính được phân tích bằng phương pháp Lyapunov. Hiệu quả của các phương pháp được kiểm chứng qua các kịch bản mô phỏng và các chỉ tiêu định lượng. Một số thuật toán đã được nghiên cứu sinh triển khai bước đầu trên mô hình robot thực cho thấy cách tiếp cận nghiên cứu phù hợp với đối tượng và đảm bảo độ tin cậy cần thiết.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Các kết quả mới chính của luận án có thể được nhìn nhận ở hai nội dung:

1) Luận án đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi hai vòng sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

2) Luận án đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

Người nhận xét đánh giá các kết quả đạt được có tính mới và đáp ứng yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án

Luận án có nội dung nghiên cứu tương đối phong phú nhưng vẫn duy trì được một chủ đề xuyên suốt là quan sát và điều khiển chịu lỗi cho NWMR.

Bố cục các chương hợp lý. Chương 1 xác định vấn đề nghiên cứu; Chương 2 xây dựng cơ sở về mô hình và bộ quan sát; Chương 3 phát triển các cấu trúc điều khiển chịu lỗi; Chương 4 tiếp tục nâng cao yêu cầu về độ bền vững và hiệu năng của hệ thống.

Các thuật toán chính đều có phân tích lý thuyết và kiểm chứng. Các kết quả so sánh định lượng được sử dụng tương đối tốt để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Một số ý kiến đề nghị nghiên cứu sinh lưu ý khi hoàn thiện

1) Để nâng cao khả năng tái lập các kết quả nghiên cứu, nghiên cứu sinh nên rà soát việc trình bày các điều kiện mô phỏng và thực nghiệm, đặc biệt là giá trị ban đầu, tham số bộ điều khiển và bộ quan sát, thời điểm xuất hiện lỗi, biên độ lỗi và các điều kiện nhiễu.

2) Nghiên cứu sinh cần rà soát, chỉnh sửa một số lỗi soạn thảo như ký hiệu, đơn vị, tên hình, tên bảng và thuật ngữ tiếng Anh trước khi hoàn thiện bản luận án lưu chiếu.

Các ý kiến trên chủ yếu nhằm nâng cao tính rõ ràng và chất lượng trình bày của luận án, không ảnh hưởng đến các kết quả và đóng góp khoa học chính.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố

Theo danh mục công trình khoa học liên quan đến luận án, nghiên cứu sinh có 09 công trình khoa học đăng trên tạp chí và hội nghị quốc tế có uy tín, bao gồm 04 công trình công bố trên tạp chí SCIE (IEEE Access; Int. Journal of Control, Automation, and Systems; Trans. of

the Institute of Measurement and Control), 02 công trình công bố trên tạp chí SCOPUS (Bulletin of Electrical Engineering and Informatics; Journal of Robotics and Control) và 03 công trình công bố ở hội thảo/hội nghị quốc tế.

Các công trình bao quát các nội dung như quan sát và bù lỗi cơ cấu chấp hành, điều khiển bám quỹ đạo chịu lỗi, điều khiển trượt dựa trên bộ quan sát, điều khiển phi mô hình, kiến trúc điều khiển lai và điều khiển chịu lỗi với hiệu năng định trước thể hiện sự phù hợp với các nội dung của luận án, cho thấy quá trình nghiên cứu của nghiên cứu sinh được thực hiện nghiêm túc, liên tục và tin cậy.

8. Kết luận chung

Luận án “Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic” là một công trình nghiên cứu được thực hiện nghiêm túc, có nội dung phù hợp với ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa và mã số ngành.

Các kết quả chính của luận án tập trung vào kiến trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng dựa trên bộ quan sát và phương pháp điều khiển trượt chịu lỗi kết hợp quan sát nhiễu với ràng buộc hiệu năng định trước là có cơ sở lý thuyết, được phân tích ổn định và kiểm chứng thông qua mô phỏng; một số thuật toán đã được triển khai bước đầu trên mô hình thực.

Bản tóm tắt luận án về cơ bản phản ánh trung thành các nội dung và kết quả nghiên cứu chính.

Tôi đánh giá luận án đáp ứng yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa và đồng ý đề nghị cho nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương được bảo vệ luận án trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện để xem xét công nhận học vị Tiến sĩ.

Hà Nội, ngày 04 tháng 09 năm 2026

Người nhận xét



TS. Đỗ Quang Hiệp

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa **Mã số:** 9 52 02 16

Tên nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Người hướng dẫn:

1. TS. Ngô Mạnh Tiến – Viện Vật lý, viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam
2. TS. Ngô Duy Tân – Trung tâm Vũ trụ Việt Nam, viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người nhận xét: PGS.TS. Hoàng Văn Xiêm

Cơ quan công tác: Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Đề tài nghiên cứu điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic có tính thời sự và ý nghĩa rõ ràng. Trong các hệ robot tự hành, lỗi cơ cấu chấp hành, trượt bánh, nhiễu và bất định mô hình có thể làm suy giảm trực tiếp độ chính xác bám quỹ đạo và độ tin cậy vận hành. Việc xây dựng bộ quan sát để ước lượng lỗi, kết hợp với bộ điều khiển có khả năng bù lỗi chủ động, vì vậy có ý nghĩa cả về lý thuyết điều khiển phi tuyến và khả năng ứng dụng cho AGV/robot dịch vụ, robot vận chuyển trong công nghiệp.

Luận án lựa chọn bài toán có giá trị thực tiễn, tập trung vào robot hai bánh chủ động và lỗi cơ cấu chấp hành. Các kết quả về kiến trúc điều khiển hai vòng dựa trên bộ quan sát và điều khiển trượt có ràng buộc hiệu năng định trước có thể làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về hệ robot có độ tin cậy cao.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Luận án có phần tổng quan tương đối hệ thống về điều khiển bám quỹ đạo, quan sát trạng thái, phát hiện lỗi và điều khiển chịu lỗi cho NWMR; đã đối chiếu các nhóm phương pháp liên quan và xác định khoảng trống nghiên cứu. Các nội dung đề xuất được gắn với các công trình đã công bố của nghiên cứu sinh. Qua nội dung luận án và danh mục tài liệu tham khảo, tôi chưa thấy dấu hiệu cho thấy đề tài trùng lặp hoàn toàn với một công trình đã công bố.

Tài liệu tham khảo khá phong phú, có cập nhật các nghiên cứu gần đây. Tuy nhiên, nghiên cứu sinh cần tiếp tục rà soát tính thống nhất của thông tin thư mục, DOI, tên thuật toán và cách ghi nguồn hình; đặc biệt một số hình sử dụng chú thích nguồn còn chung chung như “[Internet]”, chưa phù hợp với cách trích dẫn học thuật.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài phản ánh đúng đối tượng và hai nhóm nội dung trọng tâm của luận án: xây dựng bộ quan sát lỗi và phát triển bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic. Nội dung nghiên cứu thuộc lĩnh vực điều khiển phi tuyến, quan sát trạng thái, phát hiện lỗi và điều khiển robot, phù hợp với ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, mã số 9 52 02 16.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Luận án sử dụng các phương pháp có cơ sở lý thuyết rõ ràng trong điều khiển phi tuyến và điều khiển chịu lỗi như bộ quan sát lỗi, bộ quan sát trạng thái mở rộng, bộ quan sát nhiễu, điều khiển trượt, điều khiển thích nghi, i-PID/MFC và điều khiển hiệu năng định trước. Tính ổn định và hội tụ của các cấu trúc chính được phân tích bằng phương pháp Lyapunov; các thuật toán được kiểm chứng bằng mô phỏng MATLAB/Simulink và có so sánh định lượng thông qua các chỉ tiêu MSE, MAE, RMSE, IAE, ISE.

Cách tiếp cận là hiện đại và phù hợp với bài toán. Tuy vậy, độ tin cậy thực nghiệm hiện chủ yếu dựa trên mô phỏng; phần kết luận cũng thừa nhận chỉ một số thuật toán của Chương 3 mới được đánh giá bước đầu trên robot thực. Vì vậy, các nhận định về khả năng triển khai thực tế nên được diễn đạt thận trọng và cần được củng cố thêm bằng thực nghiệm đồng bộ.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

Hai đóng góp chính được luận án xác định nhìn chung phù hợp với nội dung đã thực hiện:

- 1) Đề xuất kiến trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng dựa trên bộ quan sát, cho phép khai thác thông tin ước lượng lỗi/nhiều để bù lỗi và duy trì khả năng bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.
- 2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiều cải tiến và ràng buộc hiệu năng định trước, nhằm kiểm soát đồng thời tốc độ hội tụ và hành vi quá độ của sai số bám.

Các kết quả mô phỏng cho thấy các cấu trúc đề xuất cải thiện chất lượng bám so với các bộ điều khiển đối chứng được lựa chọn. Chẳng hạn, với kiến trúc FBO-SMCESO, các chỉ số sai số tổng được báo cáo giảm đáng kể so với SMC và FSMC; với GISMC kết hợp IDO, sai số được duy trì trong miền hiệu năng định trước và khả năng phục hồi khi có lỗi được cải thiện. Tôi đánh giá các đóng góp này có ý nghĩa khoa học và đáp ứng yêu cầu của một luận án tiến sĩ, với điều kiện các giới hạn và giả thiết của phương pháp được trình bày rõ ràng.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án

Về ưu điểm, luận án có bố cục tương đối logic: Chương 1 xác định khoảng trống nghiên cứu; Chương 2 xây dựng mô hình và các bộ quan sát; Chương 3 phát triển các kiến trúc điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát; Chương 4 tập trung vào điều khiển trượt toàn cục với ràng buộc hiệu năng. Các kết quả lý thuyết được gắn với mô phỏng và nhiều nội dung đã được công bố trên các tạp chí/hội nghị quốc tế.

Một số hạn chế về nội dung cần nghiên cứu sinh làm rõ hoặc lưu ý khi hoàn thiện:

- Cần làm rõ chính xác thuật toán nào đã được thử nghiệm trên robot thực, điều kiện thí nghiệm, phần cứng và mức độ tương đồng giữa mô hình mô phỏng với hệ thực; đồng thời nên coi đây là giới hạn quan trọng của luận án.
- Ranh giới giữa “lỗi cơ cấu chấp hành” và “nhiều/bất định gộp” chưa phải lúc nào cũng thật rõ. Ở tầng động học luận án hướng tới tái tạo lỗi tường minh, nhưng ở mô hình động lực học ảnh hưởng của lỗi lại được gộp cùng nhiễu và bất định. Cần giải thích rõ điều kiện nhận dạng/khả quan sát để có thể phân biệt lỗi với nhiễu, và ý nghĩa vật lý của đại lượng được ước lượng ở từng tầng.

- Một số kết quả phụ thuộc vào các giả thiết như lỗi biến thiên chậm, nhiễu và đạo hàm nhiễu bị chặn, điều kiện trơn của mô hình và lựa chọn độ lợi quan sát. Luận án nên thảo luận rõ hơn độ nhạy đối với các tham số này, đặc biệt khi có nhiễu đo, trễ tính toán, bão hòa cơ cấu chấp hành hoặc lỗi thay đổi nhanh.
- Các phương pháp so sánh trong mô phỏng chủ yếu là PID/iPID, SMC, FSMC, ASMC, SMC-IDO. Để làm nổi bật hơn tính mới, nên thảo luận kỹ hơn tính công bằng của việc chỉnh tham số, chi phí tính toán/tín hiệu điều khiển và mối quan hệ với các phương pháp FTC dựa trên quan sát gần đây có mục tiêu tương tự.
- Chương 3 bao gồm nhiều cấu trúc điều khiển khác nhau; cần làm nổi bật hơn mối liên hệ giữa các cấu trúc này và hai đóng góp chính được tuyên bố, tránh cảm giác tập hợp nhiều thuật toán riêng lẻ.

Về hình thức trình bày, luận án cần được rà soát kỹ:

- Có một số lỗi/không thống nhất về thuật ngữ và chính tả: “NWNR/NWMR”, “quan sát/quan sát”, “quĩ/quỹ”, “chẩn đoán/chẩn đoán”; các cụm tiếng Anh như “Teminal”, “Improver Faults”, “Non-hoholomic”, “Unknow” cần sửa và chuẩn hóa.
 - Tên viết tắt và tên phương pháp chưa hoàn toàn thống nhất giữa danh mục bảng, nội dung và hình, ví dụ FBO-SMCPI/FBO-SMCESO; cần rà soát lại toàn bộ ký hiệu và tên thuật toán.
 - Danh mục bảng/hình và đánh số cần kiểm tra lại. Trong nội dung xuất hiện Bảng 3.10 nhưng danh mục bảng ở đầu luận án chưa thể hiện đầy đủ; một số tên bảng/hình và cách dùng tiếng Việt - tiếng Anh chưa đồng nhất.
 - Cần chuẩn hóa đơn vị và ký hiệu (kg , $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $\text{N} \cdot \text{m}$, $\Omega \dots$), định dạng DOI/tên tạp chí, cách viết “non-holonomic”, “fault-tolerant”, dấu câu và khoảng trắng quanh công thức.
- Các góp ý trên chủ yếu nhằm làm rõ phạm vi áp dụng và hoàn thiện cách trình bày, không làm thay đổi các kết quả chính của luận án.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố

Theo danh mục công trình liên quan, nghiên cứu sinh có 09 công trình gắn với hướng nghiên cứu của luận án, bao gồm các bài hội nghị quốc tế và các bài tạp chí được chỉ mục Scopus/SCIE. Trong đó có công trình trên IEEE Access được luận án ghi nhận SCIE-Q1; các công trình trên Transactions of the Institute of Measurement and Control, International

Journal of Control, Automation, and Systems và International Journal of Control, Automation and Systems được ghi nhận ở nhóm SCIE-Q2; cùng các công trình Scopus Q2-Q4 và hội nghị quốc tế. Khối lượng công bố là tốt và cho thấy các kết quả chính đã được phản biện, công bố từng phần.

Nghiên cứu sinh cần rà soát lại sự thống nhất giữa danh mục công trình ở cuối luận án và các công trình được dẫn tại từng chương (mã CT, thứ tự tác giả, DOI, tình trạng xuất bản, phân hạng tạp chí tại thời điểm công bố) để tránh sai khác thông tin.

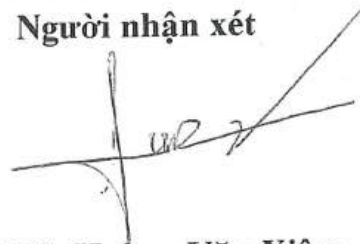
8. Kết luận chung

Luận án được thực hiện công phu, có nội dung phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, có cơ sở lý thuyết, kết quả mô phỏng và hệ thống công bố liên quan tương đối tốt. Hai đóng góp chính có ý nghĩa trong hướng điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát cho robot di động non-holonomic. Những hạn chế nêu trên chủ yếu liên quan đến mức độ kiểm chứng thực nghiệm, việc làm rõ phạm vi/giả thiết của phương pháp và chuẩn hóa hình thức trình bày.

Tôi đánh giá luận án đáp ứng yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa. Tôi đồng ý đề nghị cho nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương được bảo vệ luận án trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện để xem xét công nhận học vị Tiến sĩ.

Hà Nội, ngày tháng 09 năm 2026

Người nhận xét



PGS.TS. Hoàng Văn Xiêm

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài: *Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic*

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Tên nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Người hướng dẫn:

1. TS. Ngô Mạnh Tiến – Viện Vật lý, viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam
2. TS. Ngô Duy Tân – Trung tâm Vũ trụ Việt Nam, viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người nhận xét: PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh

Cơ quan công tác: Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án

Sự gia tăng nhanh chóng các ứng dụng của robot di động tự hành trong công nghiệp, logistics, y tế và quốc phòng đòi hỏi các hệ thống này phải hoạt động với độ tin cậy và tính tự chủ cao. Tuy nhiên, trong thực tế vận hành, robot thường xuyên chịu tác động của nhiễu, bất định mô hình và đặc biệt là các lỗi cơ cấu chấp hành – nguyên nhân trực tiếp làm sai lệch vận tốc và quỹ đạo chuyển động. Nếu không được phát hiện và xử lý kịp thời, các lỗi này có thể gây suy giảm nghiêm trọng hiệu năng, thậm chí dẫn đến mất ổn định hệ thống. Trong khi đó, nhiều phương pháp hiện có chưa xử lý triệt để loại lỗi này hoặc chưa tích hợp hiệu quả giữa quan sát và điều khiển. Do đó, việc nghiên cứu các phương pháp quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi cho robot tự hành là yêu cầu cấp thiết, có ý nghĩa cả về lý thuyết và ứng dụng.

Luận án góp phần bổ sung và phát triển lý thuyết điều khiển cho các hệ phi tuyến có ràng buộc non-holonomic, thông qua việc xây dựng mô hình động học mở rộng có xét đến lỗi cơ cấu chấp hành và nhiều chưa biết. Trên cơ sở đó, các bộ quan sát phi tuyến được nghiên cứu và cải tiến nhằm nâng cao khả năng ước lượng trạng thái và tái tạo lỗi với độ chính xác và tốc độ hội tụ cao. Đồng thời, luận án đề xuất kiến trúc tích hợp giữa bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi, góp phần làm rõ cơ chế phối hợp giữa hai thành phần này trong việc đảm bảo ổn định và chất lượng bám quỹ đạo của hệ. Các kết quả phân tích ổn định và thiết kế điều khiển dựa trên Lyapunov không chỉ có giá trị đối với bài toán cụ thể mà còn có thể mở rộng cho các hệ phi tuyến tương tự.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo

Luận án của nghiên cứu sinh không trùng lặp với các công trình nghiên cứu trước đã được công bố trong và ngoài nước.

Trích dẫn tài liệu trung thực, tham khảo rõ ràng.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với ngành và mã số

Tên đề tài phù hợp với nội dung đề tài.

Nội dung đề tài tương đối phù hợp với chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa (9.52.02.16).

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu

Luận án dựa trên mô hình toán học vững chắc của robot di động non-holonomic và phương pháp phân tích ổn định Lyapunov. Các bộ quan sát, điều khiển được thiết kế có chứng minh hội tụ, ổn định và kiểm thử qua mô phỏng nhiều trường hợp lỗi, đảm bảo lý thuyết phù hợp thực nghiệm.

Luận án áp dụng các phương pháp tiên tiến như quan sát phi tuyến (ESO, HiGO), điều khiển trượt, thích nghi và điều khiển–quan sát tích hợp, đồng thời tập

trung ước lượng, bù lỗi cơ cấu chấp hành theo hướng hiện đại, phù hợp xu thế nghiên cứu mới.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả

- Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi hai vòng sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

- Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dự trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án

- Luận án có nội dung chuyên sâu, bám sát hướng nghiên cứu hiện đại về điều khiển chịu lỗi; cách tiếp cận có tính hệ thống từ mô hình hóa – quan sát – điều khiển và kiểm chứng. Kết cấu logic, rõ ràng theo từng chương, thể hiện tốt tiến trình nghiên cứu. Hình thức trình bày tương đối chuẩn mực, thuật ngữ chuyên ngành sử dụng nhất quán.

- Luận án chủ yếu tập trung nghiên cứu các lỗi cơ cấu chấp hành mà chưa xem xét đồng thời các yếu tố như lỗi cảm biến, trễ truyền thông hoặc nhiễu phức tạp. Bên cạnh đó, các môi trường vận hành có ràng buộc như xuất hiện vật cản, thay đổi mặt nền hoặc nhiễu lớn cũng chưa được phân tích sâu. Ngoài ra, việc so sánh định lượng chi tiết với nhiều phương pháp tiên tiến còn hạn chế.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố

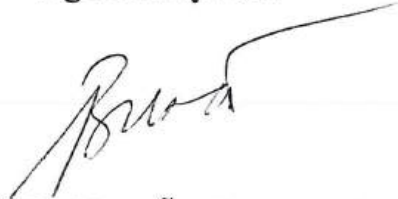
Nội dung chính của luận án đã được công bố dưới dạng các bài báo trên tạp chí và kỷ yếu hội nghị khoa học chuyên ngành, phản ánh đúng hướng nghiên cứu về quan sát và điều khiển chịu lỗi cho robot di động. Các bài đều có trong nội dung luận án và được tính điểm cao trong Hội đồng chức danh giáo sư ngành Điện , Điện tử và Tự động hóa.

8. Kết luận chung cần khẳng định mức độ đáp ứng các yêu cầu đối với một luận án tiến sĩ. Bản tóm tắt luận án phản ánh trung thành nội dung cơ bản của luận án hay không; luận án có thể đưa ra bảo vệ cấp Học viện để nhận học vị tiến sĩ được hay không.

Luận án đáp ứng đầy đủ các yêu cầu của luận án Tiến sĩ kỹ thuật theo quy định của Bộ Giáo dục và Đào tạo, đề nghị cho nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương bảo vệ Luận án trước Hội đồng chấm đánh giá luận án cấp Học viện./.

Hà nội, ngày tháng 08 năm 2026

Người nhận xét



PGS. TS. Nguyễn Quang Vịnh

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Tên đề tài luận án: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Nghiên cứu sinh: Hồ Sỹ Phương

Người hướng dẫn: 1. TS. Ngô Mạnh Tiến 2. TS. Ngô Duy Tân

Người nhận xét: PGS.TS Trương Xuân Tùng

Cơ quan công tác: Bộ môn Tự động & Kỹ thuật tính, Viện Tên lửa và Kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật quân sự.

Nội dung nhận xét:

1. Tính cần thiết, thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án.

Luận án nghiên cứu về robot di động tự hành, mô hình động học và động lực học của robot có tính đến lỗi cơ cấu chấp hành; các phương pháp quan sát trạng thái và quan sát lỗi cơ cấu chấp hành của robot; các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo và điều khiển bám quỹ đạo chịu lỗi cho robot di động tự hành. Tiếp theo NCS đã đề xuất các thuật toán quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi bám quỹ đạo cho robot di động tự hành. Tác giả sau đó mô phỏng và kiểm nghiệm các thuật toán đề xuất trên phần mềm Matlab/Simulink, kiểm chứng một phần các thuật toán đề xuất trên mô hình robot di động tự hành thực tế.

Vì vậy, có thể đánh giá luận án của NCS đã đáp ứng được các yêu cầu về tính cấp thiết của nghiên cứu, có giá trị về mặt khoa học và tạo điều kiện cho các ứng dụng thực tiễn.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình, luận án đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo.

Trong phạm vi hiểu biết của người nhận xét, luận án của NCS Hồ Sỹ Phương không trùng lặp với các công trình khoa học, đồ án, luận văn, luận án đã công bố trong và ngoài nước. Các tài liệu tham khảo trong quyền luận án được tác giả trích dẫn một cách trung thực, rõ ràng, logic và khoa học.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung, giữa nội dung với chuyên ngành và mã số chuyên ngành.

Theo nhìn nhận của người nhận xét, tên đề tài của luận án phù hợp với nội dung trình bày trong quyền luận án. Nội dung của các chương phù hợp với tên của các chương trong luận án. Nội dung của luận án phù hợp với ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, mã số ngành 9520216.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp đã sử dụng để nghiên cứu.

NCS sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết phân tích, tổng hợp các công trình nghiên cứu có liên quan trong và ngoài nước về robot di động tự hành, mô hình động học và động lực học; các phương pháp quan sát trạng thái và quan sát lỗi cơ cấu chấp hành; các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo và điều khiển bám quỹ đạo chịu lỗi. Tác giả đã phân tích, đánh giá được các ưu, nhược điểm của các phương pháp; các hạn chế, tồn tại cần phải cải thiện trong các công bố nghiên cứu liên quan; các vấn đề cần tiếp tục giải quyết đối với bài toán quan sát lỗi cơ cấu chấp hành và điều khiển chịu lỗi bám quỹ đạo cho robot di động tự hành. Từ đó, tác giả đã rút ra được những vấn đề cần nghiên cứu; xác định mục tiêu, phạm vi, đối tượng nghiên cứu, và nội dung của luận án.

Cơ sở khoa học của luận án là dựa trên nền tảng về các bộ quan sát, lý thuyết điều khiển thông minh, hiện đại và thích nghi. NCS sau đó đề xuất các thuật toán quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi bám quỹ đạo cho robot di động tự hành. Để kiểm chứng tính hiệu quả của các phương pháp đề xuất, tác giả thực hiện mô phỏng, đánh giá chúng sử dụng phần mềm Matlab/Simulink, và kiểm nghiệm một phần trên mô hình robot vật lý thực tế.

Vì vậy, phương pháp nghiên cứu của NCS là hiện đại, tin cậy, và phù hợp với nội dung và mục tiêu của luận án.

5. Kết quả nghiên cứu mới của tác giả.

Theo người nhận xét luận án có 02 đóng góp mới như sau:

+ Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi hai vòng sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

+ Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

Các kết quả nghiên cứu và đề xuất mới của luận án được lập luận một cách logic và khoa học. Các kết quả nghiên cứu đã được kiểm chứng thông qua mô phỏng trên máy tính sử dụng phần mềm Matlab/Simulink, và kiểm nghiệm một phần trên mô hình robot vật lý thực tế. Sử dụng các kết quả nghiên cứu này NCS đã công bố được 09 bài báo khoa học. Các bài báo này đều được đăng trên các Kỷ

yếu hội nghị khoa học quốc tế thuộc danh mục Scopus, Tạp chí khoa học chuyên ngành quốc tế thuộc danh mục ISI/Scopus.

Do đó, các kết quả trình bày trong luận án là có độ tin cậy. Đây là các kết quả có giá trị khoa học, góp phần làm phong phú thêm các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành, là tài liệu tham khảo có giá trị cho giảng dạy và nghiên cứu trong lĩnh vực kỹ thuật robot nói riêng, và lĩnh vực kỹ thuật điều khiển và tự động hóa nói chung.

6. Ưu điểm và nhược điểm về nội dung, kết cấu và hình thức của luận án.

Ưu điểm:

Cách đặt vấn đề, mục tiêu và phạm vi nghiên cứu của luận án khá rõ ràng, mạch lạc. Luận án có bố cục và cấu trúc tương đối hợp lý. Nội dung các chương mục của luận án được trình bày rõ ràng, thống nhất, logic và khoa học. Luận án được trình bày bằng tiếng Việt theo đúng quy định của một luận án tiến sĩ kỹ thuật. Hình thức, ngôn ngữ và văn phong trình bày trong luận án là phù hợp, rõ ràng và mạch lạc. Các đóng góp của luận án là khá tốt cả về mặt ý nghĩa khoa học và thực tiễn cho lĩnh vực kỹ thuật robot và robot tự hành. Các công bố khoa học liên quan của luận án có chất lượng tương đối tốt.

Nhược điểm:

Mặc dù luận án của NCS về cơ bản đã đáp ứng được các yêu cầu của một luận án tiến sĩ kỹ thuật. Tuy nhiên, luận án còn một số điểm cần phân tích, làm rõ, chỉnh sửa, bổ sung và hoàn thiện. Cụ thể như sau:

- Mặc dù tác giả đã so sánh các phương pháp đề xuất với các thuật toán đã có. Tuy nhiên đây đều là những thuật toán kinh điển đã được công bố từ khá lâu rồi hoặc là thuật toán do chính tác giả đề xuất. Vì vậy, theo người nhận xét các kết quả mô phỏng trình bày trong chương 2, 3, và 4 nên được so sánh với các công trình, bài báo khác trong những năm gần đây để làm rõ và kiểm chứng được tính hiệu quả của các phương pháp mà tác giả đề xuất.

- Trong các phần thí nghiệm, tác giả nên mô tả rõ hơn các kịch bản thí nghiệm, phân tích kỹ hơn về mục đích, ý nghĩa của các thí nghiệm để người đọc dễ dàng theo dõi, tư duy, suy luận và đối chiếu.

- Các kịch bản thí nghiệm cũng nên được bổ sung cho phong phú hơn để bao quát các tình huống có thể xảy ra trong quá trình hoạt động thực tế của robot.

- Trong phần thiết lập các tham số thí nghiệm, tác giả nên phân tích, giải thích và làm rõ hơn việc lựa chọn giá trị của các tham số.

- Tác giả nên trình bày kỹ và rõ ràng hơn về quá trình thực nghiệm các thuật toán trên mô hình robot vật lý thực tế, như hệ thống máy tính và cảm biến trên

robot, các nền tảng phần mềm và ngôn ngữ lập trình, việc cài đặt và hiệu chỉnh các thuật toán, quá trình thu nhận, xử lý, phân tích, và đánh giá các kết quả thí nghiệm.

- Vì đây là luận án viết bằng tiếng Việt nên tác giả nên rà soát và dịch các từ tiếng Anh trong luận án, đặc biệt là trong các hình vẽ, như ở các trang 29, 52, v.v.

- Các ký hiệu là các véc tơ, ma trận thì tác giả nên thống nhất để **chữ đậm** trong toàn bộ luận án, như các trang 30, 31, v.v.

- NCS nên rà soát lại việc đánh số các công thức, như ở trang 70, v.v.

- Trong luận án còn một số lỗi chế bản như ở các trang 12, 56, v.v. đề nghị NCS rà soát lại cẩn thận và chỉnh sửa cho phù hợp.

7. Nội dung luận án đã được công bố trên tạp chí, kỷ yếu hội nghị khoa học nào và giá trị khoa học của các công trình đã công bố.

Trong quá trình thực hiện luận án tiến sĩ, NCS Hồ Sỹ Phương đã công bố được 09 bài báo khoa học, trong đó có 08 bài báo NCS là tác giả chính. Nội dung của các bài báo đều cơ bản liên quan tới đề tài của luận án và được trình bày trong quyền luận án.

Các bài báo của tác giả đều được đăng trên các Kỷ yếu của Hội nghị khoa học quốc tế, Tạp chí khoa học chuyên ngành quốc tế, và được Hội đồng Chức danh Giáo sư Nhà nước tính điểm. Các bài báo NCS là tác giả chính cụ thể như sau:

- + Có 01 bài báo đăng trên Kỷ yếu hội nghị khoa học quốc tế, thuộc danh mục Scopus “International Conference on Control, Automation and Information Sciences”, tháng 11 năm 2023.

- + Có 01 bài báo đăng trên Kỷ yếu hội nghị khoa học quốc tế, thuộc danh mục Scopus “International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences”, tháng 3 năm 2025.

- + Có 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế, thuộc danh mục Scopus/Q2 “Journal of Robotics and Control”, tháng 12 năm 2025.

- + Có 01 bài báo đăng trên Kỷ yếu hội nghị khoa học quốc tế, thuộc danh mục Scopus “International Conference on Engineering Research and Applications”, tháng 5 năm 2026.

- + Có 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế, thuộc danh mục WoS/Q1 “IEEE Access”, tháng 2 năm 2026.

- + Có 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế, thuộc danh mục Scopus/Q3 “IEEE Access”, tháng 2 năm 2026.

+ Có 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế, thuộc danh mục WoS/Q2 “International Journal of Control, Automation, and Systems”, tháng 4 năm 2026.

+ Có 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế, thuộc danh mục WoS/Q2 “Transactions of the Institute of Measurement and Control”, tháng 6 năm 2026.

8. Kết luận

Tuy còn một số điểm cần làm rõ hơn, chỉnh sửa và bổ sung để luận án hoàn thiện hơn như đã trình bày ở trên. Luận án của NCS Hồ Sỹ Phương về cơ bản đã đáp ứng được các yêu cầu của một luận án tiến sĩ kỹ thuật, ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, mã số ngành 9520216. Người nhận xét đề nghị cho NCS Phương được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện để được nhận học vị tiến sĩ.

Hà Nội, ngày 1 tháng 09 năm 2026

Người nhận xét



Trương Xuân Tùng

*

Hà Nội, ngày 17 tháng 09 năm 2026

BIÊN BẢN CỦA

HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN

Căn cứ quyết định số 718/QĐ-HVKHCN ngày 13 tháng 8 năm 2026 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, Hội đồng đã họp vào hồi 09 giờ ngày 17 tháng 09 năm 2026 tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, số 18 đường Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội để đánh giá luận án tiến sĩ.

Họ và tên NCS: **Hồ Sỹ Phương**

Tên đề tài luận án: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn: TS. Ngô Mạnh Tiến, TS. Ngô Duy Tân

THAM DỰ BUỔI BẢO VỆ GỒM CÓ

- Đại diện cơ sở đào tạo:
 1. TS. Nguyễn Thị Trung – Phó Giám đốc Học viện KH&CN
- Đại diện Viện Công nghệ thông tin:
 1. PGS.TS. Nguyễn Trường Thắng – Viện trưởng Viện Công nghệ thông tin
- Đại diện Cơ quan chủ quản của NCS:
 1. TS. Mai Thế Anh - Trưởng Khoa Tự động Hoá, Trường Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh
- Thành viên Hội đồng có mặt: 7/7 thành viên
 1. GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh, Chủ tịch Hội đồng
 2. PGS.TS. Nguyễn Hoài Nam, Phản biện 1
 3. TS. Bùi Thị Thanh Quyên, Phản biện 2
 4. TS. Đỗ Quang Hiệp, Thư ký Hội đồng
 5. PGS.TS. Hoàng Văn Xiêm, Ủy viên
 6. PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh, Ủy viên
 7. PGS.TS. Trương Xuân Tùng, Ủy viên



- Thành viên Hội đồng vắng mặt: 0
- Đại diện tập thể cán bộ hướng dẫn: TS. Ngô Mạnh Tiến, TS. Ngô Duy Tân
- Cùng tham dự buổi bảo vệ còn có nhiều cán bộ nghiên cứu khoa học trong và ngoài Học viện.

TIẾN TRÌNH BUỔI BẢO VỆ

1. *Đại diện cơ sở đào tạo*, cô Phạm Thị Như Quỳnh, tuyên bố lý do, giới thiệu đại biểu và đọc quyết định số 718/QĐ-HVKHCN ngày 13 tháng 8 năm 2026 của Giám đốc HVKHCN về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện cho NCS Hồ Sỹ Phương và đề nghị Chủ tịch Hội đồng điều khiển phiên họp.
2. *Chủ tịch Hội đồng*, GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh, công bố danh sách thành viên có mặt là 07, thông qua chương trình buổi bảo vệ, đề nghị Thư ký thông báo các điều kiện chuẩn bị cho buổi bảo vệ và đọc lý lịch khoa học của NCS.
3. *Thư ký Hội đồng*, TS. Đỗ Quang Hiệp thông báo các điều kiện cho buổi bảo vệ
 - Đọc lý lịch khoa học của NCS Hồ Sỹ Phương.
 - Đã nhận đủ 07 nhận xét của các phản biện và các thành viên HĐ.
 - Lịch bảo vệ của NCS đã được đăng trên Công thông tin điện tử Học viện Khoa học và Công nghệ ngày 07/09/2026.
 - Các giấy tờ cần thiết khác.

NCS Hồ Sỹ Phương có đủ các điều kiện về thủ tục để bảo vệ luận án trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện.
4. Các thành viên hội đồng và những người tham dự thông qua về lý lịch khoa học và quá trình đào tạo của nghiên cứu sinh.
5. Nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương trình bày nội dung luận án trong 30 phút trước Hội đồng. Báo cáo của NCS bao gồm các nội dung chính như sau:
 - Tổng quan về quan sát trạng thái, phát hiện lỗi và điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic.
 - Phát triển bộ quan sát và phát hiện lỗi truyền động cho robot di động non-holonomic.
 - Kiến trúc điều khiển chịu lỗi phân tầng dựa trên bộ quan sát cho robot di động non-holonomic.
 - Điều khiển chịu lỗi với ràng buộc hiệu năng cho robot di động non-holonomic.
 - Các kết quả chính của luận án:
 - (1) Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.
 - (2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.
 - Kết luận và hướng phát triển của luận án.

6. Các phản biện đọc bản nhận xét và đặt câu hỏi đánh giá luận án của NCS Hồ Sỹ Phương:

1) **Phản biện 1, PGS.TS. Nguyễn Hoài Nam**, đọc nhận xét đánh giá luận án và kết luận (có văn bản kèm theo).

Còn những thiếu sót và tồn tại cần chỉnh sửa như sau:

- Thống nhất viết “non-holonomic” có gạch ngang hoặc không “nonholonomic”.
- Chưa chuẩn hóa góc ‘theta’ trong danh mục hình ảnh (hình 3.4; hình 3.19; hình 3.24); bảng 4.2.
- Câu văn chưa rõ ràng: “Trong số các loại lỗi, lỗi cơ cấu chấp hành được xem là một trong những tác giả tập trung vào?”.
- Nên sử dụng thống nhất các từ ngữ chuyên ngành Việt hóa đối với các thuật ngữ đã được Việt hóa.
- Tiêu đề của các cột nên thống nhất để tên tiếng Việt (hiện tại có bảng đề tiếng Việt, có bảng đề tiếng Anh).
- Chi tiết hơn phần chứng minh Định lý 3.2 khi có ước lượng và bù lỗi cơ cấu chấp hành để sai số bám quỹ đạo đạt ổn định tiệm cận. Trong phần chứng minh không đề cập gì tới ước lượng và bù lỗi.
- Trong các định lý và phần chứng minh, NCS nên trình bày rõ hệ kín là hệ nào (động học/động lực học); có những kết luận dành cho hệ kín nhưng không nêu rõ nên bị kết luận mang tính chất mâu thuẫn.
- Câu văn chưa chính xác “nhiều bên ngoài được suy giảm thông qua thành phần SMC”.
- Hình 3.17 đánh chữ trong ký hiệu index ($I = x, y, \theta$); đánh chữ trong bảng 4.1.
- Hình 4.2 bị mất chữ trong khối Hàm chuyển đổi; thống nhất sử dụng từ tiếng Việt trừ từ viết tắt đã được chú thích.
- Việt hóa tên các trục của hình ảnh.

Trích dẫn nguồn [internet] cần rõ ràng và đầy đủ thông tin, thêm địa chỉ trang web, thời gian truy cập. Một số cụm từ tiếng anh ở trang 8 nên lược bỏ và trích dẫn tài liệu trực tiếp.

- Bổ sung đồ thị sai lệch ước lượng.

Câu hỏi trao đổi:

Câu 1: NCS hãy làm rõ Định lý 3.3 đang xét sai số bám hay sai số ước lượng?

Câu 2: NCS hãy giải thích trong Hình 3.13 ước lượng của bộ quan sát và thực tế bám gần như trùng khớp?

Câu 3: NCS hãy làm rõ ý nghĩa hội tụ hữu hạn trong Định lý 3.5?

Câu 4: NCS hãy làm rõ thêm yếu tố độ lệch tâm của robot trong chương 4 có đề cập đến nhưng chưa được trình bày cụ thể và rõ ràng?

2) **Phản biện 2, TS. Bùi Thị Thanh Quyên**, đọc nhận xét đánh giá luận án và kết luận (có văn bản kèm theo).

Ưu điểm: Nhìn chung luận án là công trình khoa học nghiêm túc, có ý nghĩa khoa học và khả năng ứng dụng thực tiễn. Các đóng góp của luận án được công bố trong các tạp chí/kỷ yếu hội thảo chuyên ngành có uy tín. Tóm tắt luận án phản ánh đầy đủ, trung thực các kết quả nghiên cứu của luận án.

+ *Bố cục, nội dung luận án cơ bản hợp lý, logic, mạch lạc. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi nghiên cứu khá rõ ràng.*

+ *Nội dung nghiên cứu được triển khai tương đối hệ thống, từ tổng quan lý thuyết, đề xuất thuật toán, phân tích tính ổn định của hệ thống bằng phương pháp Lyapunov, đến mô phỏng kiểm chứng và đánh giá.*

Một số ý kiến chỉnh sửa, bổ sung luận án:

- Một số hình nên được Việt hóa: Hình 2.1, Hình 2.2, Hình 3.1.

- Lỗi đánh máy: trang 53, dòng 4 từ dưới lên.

- Câu chữ lủng củng: trang 8, dòng 18-19 từ trên xuống.

- Từ/cụm từ nên dùng thống nhất xuyên suốt luận án: Trang 81, 83: lỗi cơ cấu chấp hành, lỗi của bộ truyền động.

- Các thông số mô hình robot sử dụng trong mô phỏng, nếu được tham khảo ở tài liệu khác thì nên trích dẫn Ref. đầy đủ.

- Nên giải thích ngay khi biến/hàm xuất hiện lần đầu tiên: $H(\varepsilon^*)$ xuất hiện ở trang 96, sang giữa trang 97 mới giải thích H, ε^* .

- Một số tài liệu tham khảo quốc tế gần giai đoạn 2025–2026 nên được cập nhật thêm (Ref. năm 2025-2026 hiện khá ít).

- Mục 3.1.3 Mô phỏng và đánh giá cho 03 bộ điều khiển: PID, iPID không có FO và MFC-iPID (Bảng 3.1), tuy nhiên chú thích trong Hình 3.3 - 3.8 chưa đồng nhất với tên các bộ ĐK: iPID without FO, PID FO, MFC-iPID FO, PID without FO, Proposed gây khó theo dõi. Tương tự cho Hình 3.20-3.26.

- Trang 58, dòng 3 từ trên xuống: “Trong kịch bản thứ hai, lỗi cơ cấu chấp hành được đưa vào hệ thống tại thời điểm $t = 8s$... đồng thời các tham số của robot như khối lượng m và mô men quán tính I cũng thay đổi 10% theo thời gian”.

Trang 58 cụm từ “thay đổi 10% theo thời gian” chưa thực sự rõ nghĩa, khá mơ hồ. Hãy làm rõ thêm cụm từ này trong phần mô phỏng với $t_{time} = 25s$ và chỉnh lại rõ nghĩa hơn.

- Trang 60, NCS viết “Hình 3.8 minh họa vai trò của bộ quan sát lỗi..., với thời điểm phát hiện lỗi vào khoảng 8,007 s tương ứng với độ trễ phát hiện khoảng 0,007 s”. Tuy nhiên dựa vào Hình 3.8 rất khó để nhận ra lỗi cơ cấu chấp hành đưa vào tại thời điểm 8s và 8,007 s thì phát hiện ra lỗi. Cần đưa ra minh chứng cụ thể, trực quan hơn.

- Trang 71, phần giải thích về các Hình nhưng có đề cập thêm các thông số trong Bảng 3.3 và 3.4 thì cần chú giải rõ thông số đó xem trong bảng nào. Ví dụ: “..., thể hiện qua chỉ số ISE (2.13 so với 2.21 của B-SMC)”, thông số 2.13 và 2.21 ở Bảng nào?

- Trang 72: Dòng 3-8 từ trên xuống: thực tế rất khó để nhìn ra “đặc biệt là trên đoạn cong trong khoảng 20-25 giây khi xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành”, “độ lệch ngang cực đại luôn nhỏ hơn 0.1 m” => chỉnh sửa lại cho hợp lý.

Nhìn chung, các nội dung cần chỉnh sửa chủ yếu mang tính hoàn thiện và nâng cao chất lượng trình bày, không ảnh hưởng đến các kết quả khoa học chính của luận án.

Câu hỏi trao đổi: Hàm lập lịch được chọn trong (2.38) có được tham khảo ở tài liệu nào không? Nếu không thì lý do tại sao chọn như vậy?

NCS Hồ Sỹ Phương tiếp thu các góp ý về lỗi soạn thảo, nội dung, bố cục và nghiêm túc chỉnh sửa theo các ý kiến góp ý của 02 phản biện. NCS xin phép trả lời làm rõ các câu hỏi trao đổi của phản biện như sau:

1) Định lý 3.3 chủ yếu xét ổn định của tăng động lực học, cụ thể là biến trượt và sai số bám vận tốc. Sai số ước lượng của HiGO chỉ đóng vai trò là nhiễu ghép vào hệ kín và đã được phân tích riêng ở phần bộ quan sát. Vì vậy, kết luận của Định lý 3.3 được hiểu là sai số bám động lực học là UUB; nếu sai số quan sát hội tụ về 0 thì sai số bám mới hội tụ tiệm cận về 0. NCS sẽ hiệu chỉnh lại phát biểu định lý để làm hơn rõ sai số bám và sai số quan sát.

2) Hình 3.13 cho thấy tín hiệu ước lượng gần trùng với tín hiệu thực chủ yếu vì kết quả đang ở mức mô phỏng, trong đó mô hình hệ, nhiễu và lỗi được biết rõ, đồng thời các hệ số quan sát đã được hiệu chỉnh để sai số ước lượng nhỏ. Vì vậy, sau giai đoạn quá độ, tín hiệu ước lượng có thể bám rất sát tín hiệu thực. Trong triển khai thực tế, do nhiễu cảm biến, sai lệch mô hình, trễ tính toán và giới hạn phần cứng, mức độ trùng khớp này sẽ khó đạt được tương tự.

3) Trong Định lý 3.5, “hội tụ hữu hạn thời gian” trước hết nói đến biến trượt của vòng điều khiển động lực học được đưa tới mặt trượt $\delta = 0$, hoặc một lân cận rất nhỏ của mặt trượt khi tồn tại sai số ESO, trong một thời gian hữu hạn. Ở đây không hiểu trực tiếp là toàn bộ sai số vị trí bằng 0 sau thời gian hữu hạn. Sau khi đạt mặt trượt, động học giảm bậc mới quyết định sự hội tụ của sai số bám.

4) Vấn đề độ lệch tâm trong chương 4, độ lệch tâm được biểu diễn bởi khoảng cách d từ tâm hình học O_R đến tâm khối lượng G (d được xác định thông qua d_x và d_y). Khi $d \neq 0$, chuyển động tịnh tiến và quay bị liên kết mạnh hơn; d xuất hiện trong ma trận động học và các ma trận quán tính/Coriolis, làm thay đổi động lực học của robot và được đưa vào các thành phần bất định cần quan sát, bù.

5) Về hàm lập lịch trong (2.38): Hàm này không sao chép nguyên dạng từ một tài liệu cụ thể, mà được NCS xây dựng trong quá trình cải tiến bộ quan sát.

Cơ sở lựa chọn xuất phát từ vấn đề quá độ ban đầu của bộ quan sát. Nếu áp dụng ngay toàn bộ hệ số khuếch đại lớn tại $t=0$, sai lệch điều kiện đầu có thể bị khuếch đại và tạo ra hiện tượng peaking. Vì vậy, NCS sử dụng một hàm lập lịch để đưa độ lợi từ giá trị ban đầu lên giá trị thiết kế một cách liên tục.

7. Các thành viên khác trong Hội đồng đưa ra ý kiến nhận xét; Hội đồng và những người tham dự đặt câu hỏi

(1) PGS.TS. Hoàng Văn Xiêm

Luận án có bố cục tương đối logic: Chương 1 xác định khoảng trống nghiên cứu; Chương 2 xây dựng mô hình và các bộ quan sát; Chương 3 phát triển các kiến trúc điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát; Chương 4 tập trung vào điều khiển trượt toàn cục với ràng buộc hiệu năng. Các kết quả lý thuyết được gắn với mô phỏng và nhiều nội dung đã được công bố trên các tạp chí/hội nghị quốc tế.

Một số hạn chế về nội dung cần nghiên cứu sinh làm rõ hoặc lưu ý khi hoàn thiện:

- Cần làm rõ chính xác thuật toán nào đã được thử nghiệm trên robot thực, điều kiện thí nghiệm, phần cứng và mức độ tương đồng giữa mô hình mô phỏng với hệ thực; đồng thời nêu coi đây là giới hạn quan trọng của luận án.
- Ranh giới giữa “lỗi cơ cấu chấp hành” và “nhiều/bất định gộp” chưa phải lúc nào cũng thật rõ. Ở tầng động học luận án hướng tới tái tạo lỗi tường minh, nhưng ở mô hình động lực học ảnh hưởng của lỗi lại được gộp cùng nhiễu và bất định. Cần giải thích rõ điều kiện nhận dạng/khả quan sát để có thể phân biệt lỗi với nhiễu, và ý nghĩa vật lý của đại lượng được ước lượng ở từng tầng.
- Một số kết quả phụ thuộc vào các giả thiết như lỗi biến thiên chậm, nhiễu và đạo hàm nhiễu bị chặn, điều kiện trơn của mô hình và lựa chọn độ lợi quan sát. Luận án nên thảo luận rõ hơn độ nhạy đối với các tham số này, đặc biệt khi có nhiễu đo, trễ tính toán, bão hòa cơ cấu chấp hành hoặc lỗi thay đổi nhanh.
- Các phương pháp so sánh trong mô phỏng chủ yếu là PID/iPID, SMC, FSMC, ASMC, SMC-IDO. Để làm nổi bật hơn tính mới, nên thảo luận kỹ hơn tính công bằng của việc chỉnh tham số, chi phí tính toán/tín hiệu điều khiển và mối quan hệ với các phương pháp FTC dựa trên quan sát gần đây có mục tiêu tương tự.
- Chương 3 bao gồm nhiều cấu trúc điều khiển khác nhau; cần làm nổi bật hơn mối liên hệ giữa các cấu trúc này và hai đóng góp chính được tuyên bố, tránh cảm giác tập hợp nhiều thuật toán riêng lẻ.

Về hình thức trình bày, luận án cần được rà soát kỹ:

- Có một số lỗi/không thống nhất về thuật ngữ và chính tả: “NWNR/NWMR”, “quan sát/quan sát”, “quĩ/quỹ”, “chuẩn đoán/chẩn đoán”; các cụm tiếng Anh như “Teminal”, “Improver Faults”, “Non-holonomic”, “Unknow” cần sửa và chuẩn hóa.

- Tên viết tắt và tên phương pháp chưa hoàn toàn thống nhất giữa danh mục bảng, nội dung và hình, ví dụ FBO-SMCPI/FBO-SMCESO; cần rà soát lại toàn bộ ký hiệu và tên thuật toán.

- Danh mục bảng/hình và đánh số cần kiểm tra lại. Trong nội dung xuất hiện Bảng 3.10 nhưng danh mục bảng ở đầu luận án chưa thể hiện đầy đủ; một số tên bảng/hình và cách dùng tiếng Việt - tiếng Anh chưa đồng nhất.

- Cần chuẩn hóa đơn vị và ký hiệu (kg , $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $\text{N}\cdot\text{m}$, Ω ...), định dạng DOI/tên tạp chí, cách viết “non-holonomic”, “fault-tolerant”, dấu câu và khoảng trắng quanh công thức.

Các góp ý trên chủ yếu nhằm làm rõ phạm vi áp dụng và hoàn thiện cách trình bày, không làm thay đổi các kết quả chính của luận án.

(2) PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh

- Luận án có nội dung chuyên sâu, bám sát hướng nghiên cứu hiện đại về điều khiển chịu lỗi; cách tiếp cận có tính hệ thống từ mô hình hóa – quan sát – điều khiển và kiểm chứng. Kết cấu logic, rõ ràng theo từng chương, thể hiện tốt tiến trình nghiên cứu. Hình thức trình bày tương đối chuẩn mực, thuật ngữ chuyên ngành sử dụng nhất quán.

- Luận án chủ yếu tập trung nghiên cứu các lỗi cơ cấu chấp hành mà chưa xem xét đồng thời các yếu tố như lỗi cảm biến, trễ truyền thông hoặc nhiễu phức tạp. Bên cạnh đó, các môi trường vận hành có ràng buộc như xuất hiện vật cản, thay đổi mặt nền hoặc nhiễu lớn cũng chưa được phân tích sâu. Ngoài ra, việc so sánh định lượng chi tiết với nhiều phương pháp tiên tiến còn hạn chế.

(3) PGS.TS. Trương Xuân Tùng

Cách đặt vấn đề, mục tiêu và phạm vi nghiên cứu của luận án khá rõ ràng, mạch lạc. Luận án có bố cục và cấu trúc tương đối hợp lý. Nội dung các chương mục của luận án được trình bày rõ ràng, thống nhất, logic và khoa học. Luận án được trình bày bằng tiếng Việt theo đúng quy định của một luận án tiến sĩ kỹ thuật. Hình thức, ngôn ngữ và văn phong trình bày trong luận án là phù hợp, rõ ràng và mạch lạc. Các đóng góp của luận án là khá tốt cả về mặt ý nghĩa khoa học và thực tiễn cho lĩnh vực kỹ thuật robot và robot tự hành. Các công bố khoa học liên quan của luận án có chất lượng tương đối tốt.

Nhược điểm:

Mặc dù luận án của NCS về cơ bản đã đáp ứng được các yêu cầu của một luận án tiến sĩ kỹ thuật. Tuy nhiên, luận án còn một số điểm cần phân tích, làm rõ, chỉnh sửa, bổ sung và hoàn thiện. Cụ thể như sau:

- Mặc dù tác giả đã so sánh các phương pháp đề xuất với các thuật toán đã có. Tuy nhiên đây đều là những thuật toán kinh điển đã được công bố từ khá lâu rồi hoặc là thuật toán do chính tác giả đề xuất. Vì vậy, theo người nhận xét các kết quả mô phỏng trình bày trong chương 2, 3, và 4 nên được so sánh với các công trình, bài báo khác trong những năm gần đây để làm rõ và kiểm chứng được tính hiệu quả của các phương pháp mà tác giả đề xuất.

- Trong các phần thí nghiệm, tác giả nên mô tả rõ hơn các kịch bản thí nghiệm, phân tích kỹ hơn về mục đích, ý nghĩa của các thí nghiệm để người đọc dễ dàng theo dõi, tư duy, suy luận và đối chiếu.
- Các kịch bản thí nghiệm cũng nên được bổ sung cho phong phú hơn để bao quát các tình huống có thể xảy ra trong quá trình hoạt động thực tế của robot.
- Trong phần thiết lập các tham số thí nghiệm, NCS nên phân tích, giải thích và làm rõ hơn việc lựa chọn giá trị của các tham số.
- NCS nên trình bày kỹ và rõ ràng hơn về quá trình thực nghiệm các thuật toán trên mô hình robot vật lý thực tế, như hệ thống máy tính và cảm biến trên robot, các nền tảng phần mềm và ngôn ngữ lập trình, việc cài đặt và hiệu chỉnh các thuật toán, quá trình thu nhận, xử lý, phân tích và đánh giá các kết quả thí nghiệm.
- Vì đây là luận án viết bằng tiếng Việt nên tác giả nên rà soát và dịch các từ tiếng Anh trong luận án, đặc biệt là trong các hình vẽ, như ở các trang 29, 52, v.v.
- Các ký hiệu là các véc tơ, ma trận nên thống nhất để chữ đậm trong toàn bộ luận án, như các trang 30, 31, v.v.
- NCS nên rà soát lại việc đánh số các công thức, như ở trang 70, v.v.
- Trong luận án còn một số lỗi chế bản như ở các trang 12, 56, v.v. đề nghị NCS rà soát lại cẩn thận và chỉnh sửa cho phù hợp.

Câu hỏi trao đổi: NCS hãy giải thích lỗi cơ cấu chấp hành được tạo ra và đưa vào hệ thống như thế nào trong quá trình thực nghiệm?

(4) TS. Đỗ Quang Hiệp

Một số ý kiến đề nghị nghiên cứu sinh lưu ý khi hoàn thiện:

- 1) Để nâng cao khả năng tái lập các kết quả nghiên cứu, nghiên cứu sinh nên rà soát việc trình bày các điều kiện mô phỏng và thực nghiệm, đặc biệt là giá trị ban đầu, tham số bộ điều khiển và bộ quan sát, thời điểm xuất hiện lỗi, biên độ lỗi và các điều kiện nhiễu.
- 2) Nghiên cứu sinh nên tiếp tục rà soát một số lỗi soạn thảo, ký hiệu, đơn vị, tên hình, tên bảng và thuật ngữ tiếng Anh trước khi hoàn thiện bản luận án lưu chiểu.

Các ý kiến trên chủ yếu nhằm nâng cao tính rõ ràng và chất lượng trình bày của luận án, không ảnh hưởng đến các kết quả và đóng góp khoa học chính.

(5) GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh

Câu hỏi trao đổi: NCS hãy giải thích cơ chế phối hợp giữa bộ quan sát nhiễu và bộ quan sát lỗi trong cấu trúc điều khiển đề xuất?

8. NCS Hồ Sỹ Phương tiếp thu ý kiến nhận xét, góp ý của các thành viên của Hội đồng. NCS trả lời các câu hỏi của các thành viên Hội đồng.

NCS Hồ Sỹ Phương tiếp thu các góp ý về lỗi soạn thảo, nội dung, bố cục và nghiêm túc chỉnh sửa theo các ý kiến góp ý của các thành viên hội đồng. NCS xin phép làm rõ các câu hỏi trao đổi của các thành viên trong hội đồng như sau:

1) Trong Chương 3, thuật toán đã được thực nghiệm trên robot thực là cấu trúc FB-IFO-SMC-PI-ESO; các thuật toán còn lại chủ yếu được kiểm chứng bằng mô phỏng. Thực nghiệm cho thấy khả năng triển khai của cấu trúc đề xuất, nhưng sai khác giữa mô hình và hệ thực do nhiễu đo, trễ tính toán, bão hòa và bất định phần cứng vẫn là một giới hạn quan trọng của luận án.

2) Về mô hình hóa, ở tầng động học, lỗi cơ cấu chấp hành được tách và ước lượng tường minh qua Δv , $\Delta \omega$ để bù trực tiếp; còn ở tầng động lực học, lỗi cùng nhiễu và bất định được xem như nhiễu gộp tương đương để ESO/HiGO ước lượng. Việc phân biệt riêng lỗi và nhiễu chỉ khả thi khi kênh lỗi có cấu trúc xác định và hệ thỏa điều kiện quan sát/nhận dạng.

3) Trong phạm vi mô phỏng, các phương pháp đối chứng được đánh giá trên cùng mô hình, quỹ đạo và kịch bản lỗi-nhiễu để bảo đảm tính nhất quán; khi triển khai thực nghiệm, NCS sẽ quan tâm sâu hơn đến nhiễu đo, trễ tính toán, bão hòa cơ cấu chấp hành, lỗi biến thiên nhanh, chi phí tính toán và nỗ lực điều khiển vì đây là các yếu tố quyết định khả năng thực thi thời gian thực.

4) Các cấu trúc trong Chương 3 được xây dựng theo mức độ tích hợp quan sát tăng dần, từ MFC-iPID, DOA-SMC đến FB-IFO-SMC-PI-ESO, nên đây là một lộ trình phát triển thống nhất của đóng góp về điều khiển chịu lỗi phân tầng dựa trên quan sát, không phải tập hợp các thuật toán rời rạc.

5) Trong thực nghiệm, lỗi suy giảm hiệu suất cơ cấu chấp hành được tạo bằng mạch chuyển mạch relay kết hợp điện trở công suất trên đường cấp nguồn cho động cơ. Khi relay chuyển sang trạng thái lỗi, điện áp hiệu dụng cấp cho động cơ bị suy giảm, làm giảm mô-men và tốc độ truyền động, qua đó mô phỏng hiện tượng mất hiệu suất của cơ cấu chấp hành trên robot thực.

6) Trong cấu trúc điều khiển đề xuất, bộ quan sát nhiễu và bộ quan sát lỗi đảm nhiệm hai chức năng khác nhau nhưng bổ sung cho nhau. Bộ quan sát lỗi FO/IFO được sử dụng chủ yếu ở tầng động học để ước lượng tường minh các sai lệch do lỗi cơ cấu chấp hành, từ đó tạo tín hiệu bù lỗi trực tiếp trong luật điều khiển động học. Trong khi đó, HiGO/ESO ở tầng động lực học dùng để tái tạo các trạng thái không đo được và/hoặc ước lượng nhiễu gộp bao gồm bất định mô hình, nhiễu ngoài và phản ảnh hưởng động lực học chưa biết.

9. Đại diện tập thể hướng dẫn phát biểu ý kiến bằng văn bản.

10. Hội đồng tiến hành họp riêng để bầu ban kiểm phiếu, bỏ phiếu kín và thảo luận thông qua quyết nghị của Hội đồng.

1) Bầu ban kiểm phiếu gồm:

- Trưởng ban: PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh
- Ủy viên: PGS.TS. Hoàng Văn Xiêm
- Ủy viên: TS. Đỗ Quang Hiệp

2) Bỏ phiếu kín và thảo luận thông qua Quyết nghị của Hội đồng.

- Trưởng ban kiểm phiếu, PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh công bố kết quả kiểm phiếu (có biên bản kiểm phiếu).
- Chủ tịch Hội đồng, GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh, thông qua Quyết nghị (có văn bản kèm theo).

3) Tóm tắt nghị quyết của Hội đồng

3.1. Tính phù hợp của tên đề tài và sự không trùng lặp về nội dung luận án

- Tên đề tài, nội dung và kết quả nghiên cứu của luận án phù hợp với Ngành đào tạo “Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa”, mã số “9 52 02 16”.
- Nội dung của luận án không trùng lặp với các luận án đã bảo vệ và các kết quả nghiên cứu đã công bố trong và ngoài nước.
- Các tài liệu tham khảo của luận án có nội dung phù hợp và đã được trích dẫn trong luận án.

3.2. Các kết quả chính của luận án

Luận án có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, những đóng góp mới của luận án cụ thể như sau:

- (1) Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.
- (2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước. .

3.3. Các điểm cần bổ sung chỉnh sửa trước khi nộp luận án cho Thư viện Quốc gia Việt Nam

NCS cần tiếp thu, rà soát, chỉnh sửa, bổ sung nội dung luận án theo ý kiến đóng góp trong bản nhận xét của các thành viên Hội đồng và Biên bản của Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện trước khi nộp luận án cho Thư viện Quốc gia Việt Nam.

3.4. Mức độ đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ về cả nội dung và hình thức

- Luận án của NCS Hồ Sỹ Phương đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ ngành “Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa”, mã số “9 52 02 16” về nội dung và hình thức theo các qui chế hiện hành về đào tạo tiến sĩ của Bộ Giáo dục và Đào tạo, của Học viện Khoa học và Công nghệ.
- Đề nghị Học viện Khoa học và Công nghệ công nhận kết quả bảo vệ và cấp bằng tiến

sĩ cho NCS Hồ Sỹ Phương sau khi chỉnh sửa, bổ sung luận án theo các góp ý của Hội đồng.

11. Tổng kết

- Trưởng ban kiểm phiếu, PGS.TS. Nguyễn Quang Vịnh, công bố kết quả bỏ phiếu đánh giá luận án.
- Chủ tịch Hội đồng, GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh, đọc Quyết nghị của Hội đồng.
- Chủ tịch Hội đồng tuyên bố Hội đồng đã hoàn thành nhiệm vụ và trao lại quyền điều khiển cho Cơ sở đào tạo.
- Các đại biểu và NCS phát biểu ý kiến.
- Đại diện cơ sở đào tạo tuyên bố kết thúc buổi bảo vệ luận án tiến sĩ.

Biên bản họp Hội đồng này được 7/7 ủy viên Hội đồng biểu quyết công khai thông qua.

Buổi họp Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện kết thúc vào lúc 11 giờ 30 phút, ngày 17 tháng 09 năm 2026.

Thư ký Hội đồng



TS. Đỗ Quang Hiệp

Chủ tịch Hội đồng



GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh

XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO

**KT. GIÁM ĐỐC
PHÓ GIÁM ĐỐC**



Nguyễn Thị Trung



Hà Nội, ngày 17 tháng 09 năm 2026

**QUYẾT NGHỊ CỦA
HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN**

Căn cứ quyết định số 718/QĐ-HVKHCN ngày 13 tháng 8 năm 2026 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, Hội đồng đã họp vào hồi 9 giờ 00 ngày 17 tháng 09 năm 2026 tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, số 18 đường Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội để đánh giá luận án tiến sĩ.

Họ và tên NCS: **Hồ Sỹ Phương**

Tên đề tài luận án: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn: TS. Ngô Mạnh Tiến, TS. Ngô Duy Tân



**HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN TIẾN SĨ CẤP HỌC VIỆN CỦA
NCS HỒ SỸ PHƯƠNG KẾT LUẬN**

1. Tính phù hợp của tên đề tài và sự không trùng lặp về nội dung luận án

- Tên đề tài, nội dung và kết quả nghiên cứu của luận án phù hợp với ngành đào tạo Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, mã số 9 52 02 16.

- Nội dung của luận án không trùng lặp với các luận án đã bảo vệ và các kết quả nghiên cứu đã công bố trong và ngoài nước.

- Các tài liệu tham khảo của luận án có nội dung phù hợp và đã được trích dẫn trong luận án.

2. Kết quả, ý nghĩa khoa học, thực tiễn của đề tài

Luận án có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, những đóng góp mới của luận án cụ thể như sau:

(1) Đề xuất bộ điều khiển chịu lỗi sử dụng bộ quan sát lỗi cho phép ước lượng - bù lỗi hiệu quả và đảm bảo ổn định, bám quỹ đạo trong điều kiện có lỗi cơ cấu chấp hành.

(2) Đề xuất thuật toán điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt toàn cục kết hợp bộ quan sát nhiễu và ràng buộc hiệu năng định trước.

3. Những thiếu sót của luận án, vấn đề cần bổ sung, sửa chữa

NCS cần tiếp thu, rà soát, chỉnh sửa, bổ sung nội dung luận án theo ý kiến đóng góp trong bản nhận xét của các thành viên Hội đồng và Biên bản của Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện trước khi nộp luận án cho Thư viện Quốc gia Việt Nam. Đặc biệt cần làm nổi bật đóng góp mới, cải thiện chất lượng bản thảo Luận án.

4. Mức độ đáp ứng yêu cầu của luận án tiến sĩ về cả nội dung và hình thức theo các quy chế hiện hành về đào tạo tiến sĩ của Bộ Giáo dục và Đào tạo

Luận án của NCS Hồ Sỹ Phương đáp ứng yêu cầu của một luận án tiến sĩ ngành “Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa”, mã số 9 52 02 16 về nội dung và hình thức theo các quy chế hiện hành về đào tạo tiến sĩ của Bộ Giáo dục và Đào tạo và của Học viện Khoa học và Công nghệ.



Kết luận:

Kết quả bỏ phiếu đánh giá luận án của Hội đồng: 7/7 thành viên tán thành, trong đó có 4/7 phiếu xuất sắc.

Hội đồng kết luận thông qua luận án, đề nghị Học viện Khoa học và Công nghệ công nhận kết quả bảo vệ và cấp bằng tiến sĩ cho NCS Hồ Sỹ Phương.

Quyết nghị này được 7/7 thành viên Hội đồng biểu quyết công khai thông qua.

THƯ KÝ

TS. Đỗ Quang Hiệp

CHỦ TỊCH

GS.TSKH. Nguyễn Đông Anh

XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO



Nguyễn Thị Trung

**BẢN GIẢI TRÌNH CHỈNH SỬA, BỔ SUNG LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CẤP HỌC VIỆN**

Ngày 01 tháng 10 năm 2026, Học viện Khoa học và Công nghệ đã tổ chức đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện cho nghiên cứu sinh Hồ Sỹ Phương theo Quyết định số 718/QĐ-HVKHCN ngày 13 tháng 08 năm 2026 của Giám đốc Học viện.

Đề tài: Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa,

Mã số: 9 52 02 16

Người hướng dẫn khoa học: 1. TS. Ngô Mạnh Tiến 2. TS. Ngô Duy Tân

Theo Biên bản của Hội đồng, NCS phải bổ sung và chỉnh sửa luận án các điểm sau đây:

STT	Nội dung đề nghị chỉnh sửa, bổ sung	Nội dung đã được chỉnh sửa, bổ sung (Ghi rõ số trang/chương/mục... đã được chỉnh sửa)
1	Chưa chuẩn hóa góc 'theta' trong danh mục hình ảnh (hình 3.4; hình 3.19; hình 3.24); bảng 4.2.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa chuẩn hóa về ký hiệu góc θ trong danh mục hình ảnh: <i>Hình 3.4; Hình 3.19; Hình 3.24; Bảng 4.2.</i>
2	Câu văn chưa rõ ràng: “Trong số các loại lỗi, lỗi cơ cấu chấp hành được xem là một trong những tác giả tập trung vào?”	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa: Trong số các loại lỗi, lỗi cơ cấu chấp hành được xem là nhóm lỗi có ảnh hưởng nghiêm trọng nhất vì chúng tác động trực tiếp lên tín hiệu điều khiển vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc của robot [7], [8]. <i>Mục 1.1.2, trang 8</i>
3	Tiêu đề của các cột, bảng nên thống nhất để tên tiếng Việt	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa về tên tiếng việt cho tất cả các bảng biểu toàn luận án.
4	Chi tiết hơn phần chứng minh Định lý 3.2 khi có ước lượng và bù lỗi cơ cấu chấp hành để sai số bám quỹ đạo đạt ổn định tiệm cận.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa bổ sung chi tiết phần chứng minh. <i>Mục 3.2.2. trang 64-65</i>
5	Trong các định lý và phần chứng minh, NCS nên trình bày rõ hệ kín là hệ nào (động học/động lực học)	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa bổ sung và nêu rõ hệ kín của vòng động học, vòng động lực học trong các

Lưu ý: Các chữ ký xác nhận cần gắn với nội dung trên cùng một trang giấy. Học viện sẽ không xác nhận nếu phần chữ ký tách rời với nội dung



		định lý <i>Mục 3.1.2 (trang 54); Mục 3.2.3 (trang 64)</i>
6	Chuẩn hóa lại câu “nhiều bên ngoài được suy giảm thông qua thành phần SMC”	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa. <i>Mục 3.2.3, trang 64</i>
7	Hình 3.17 đánh chữ trong ký hiệu index ($I = x, y, \theta$); đánh chữ trong bảng 4.1. Hình 4.2 bị mất chữ trong khối Hàm chuyển đổi;	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa: Hình 3.17 (trang 77); Hình 4.2 (trang 99); Bảng 4.1 (trang 101).
8	Bổ sung đồ thị sai lệch ước lượng.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa đồ thị sai lệch ước lượng cho các bộ quan sát. <i>Mục 2.3.2, trang 48-49</i>
9	Viết hóa tên các trục của hình ảnh	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa viết hóa tên các trục.
10	Trích dẫn nguồn [internet] cần rõ ràng và đầy đủ thông tin, thêm địa chỉ trang web, thời gian truy cập. Một số cụm từ tiếng anh ở trang 8 nên lược bỏ và trích dẫn tài liệu trực tiếp.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa nguồn trích dẫn. <i>Mục 1.1.1, trang 7</i>
11	Một số hình nên được Viết hóa: Hình 2.1, Hình 2.2, Hình 3.1.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa và Viết hóa các hình ảnh
12	Nên giải thích ngay khi biến/hàm xuất hiện lần đầu tiên: $H(\varepsilon^*)$ xuất hiện ở trang 96, sang giữa trang 97 mới giải thích H, ε^* .	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa bổ sung. <i>Mục 4.2.2, trang 97,98</i>
13	Một số tài liệu tham khảo quốc tế gần giai đoạn 2025–2026 nên được cập nhật thêm.	NCS đã bổ sung tài liệu tham khảo [85]-[90] giai đoạn 2025-2026 và trích dẫn: <i>Mục 1.2.2 (trang 12); 1.4.1 (trang 18); 1.4.2 (trang 21) và 1.5 (trang 25).</i>
14	Mục 3.1.3 Mô phỏng và đánh giá cho 03 bộ điều khiển: PID, iPID không có FO và MFC-iPID (Bảng 3.1), tuy nhiên chú thích trong Hình 3.3 - 3.8 chưa đồng nhất với tên các bộ ĐK: iPID without FO, PID FO, MFC-iPID FO, PID without FO, Proposed gây khó theo dõi. Tương tự cho Hình 3.20-3.26.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa và đồng nhất tên các bộ điều khiển trong bảng biểu và các hình ảnh <i>Mục 3.1.3: trang 57-60</i>
15	Trang 58 cụm từ “thay đổi 10% theo thời gian” chưa thực sự rõ nghĩa, khá mơ hồ. Hãy làm rõ thêm cụm từ này trong phần mô phỏng với time = 25s và chỉnh lại rõ nghĩa hơn.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa bổ sung và làm rõ cụm từ bằng biểu thức toán học. <i>Mục 3.1.3, trang 58</i>
	Hình 3.8 rất khó để nhận ra lỗi cơ cấu chấp hành đưa vào tại thời điểm 8s và	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa bổ sung minh chứng trực quan hơn.

	8,007 s thì phát hiện ra lỗi. Cần đưa ra minh chứng cụ thể, trực quan hơn.	Mục 3.1.3, trang 59
16	Trang 71, phần giải thích về các Hình nhưng có đề cập thêm các thông số trong Bảng 3.3 và 3.4 thì cần chú giải rõ thông số đó xem trong bảng nào. Ví dụ: "..., thể hiện qua chỉ số ISE, thông số 2.13 và 2.21 ở Bảng nào? Trang 72: Chính sửa lại hợp lý dòng 3-8 từ trên xuống: vì thực tế rất khó để nhìn ra khoảng thời gian.	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa và bổ sung chú giải. Mục 3.2.4, trang 71 -72
17	Rà soát lại toàn bộ ký hiệu và tên thuật toán một cách thống nhất	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và đã chỉnh sửa và thống nhất Mục 3.1.2, 3.1.3 (trang 55-60); Mục 3.2 (trang 60); Mục 3.3 (trang 72)
18	Rà soát lỗi soạn thảo, ký hiệu, đơn vị, tên hình, tên bảng và thuật ngữ tiếng Anh	NCS đã nghiêm túc tiếp thu và rà soát chỉnh sửa trong toàn luận án

Nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn Quý thầy, cô trong Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện đã góp ý và tạo cơ hội cho NCS hoàn thiện luận án của mình.

Xin trân trọng cảm ơn.

Hà Nội, ngày 01 tháng 10 năm 2026

NGƯỜI HƯỚNG DẪN 1



TS. Ngô Mạnh Tiến

XÁC NHẬN CỦA
HỌC VIỆN KHCN



NGƯỜI HƯỚNG DẪN 2



TS. Ngô Duy Tân

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG



GS. TSKH. Nguyễn Đông Anh

NGHIÊN CỨU SINH



Hồ Sỹ Phương

THƯ KÝ



TS. Đỗ Quang Hiệp

Nguyễn Thị Trung