

**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**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA
Mã số: 9 52 02 16**

Hà Nội - 2026

**Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ,
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam**

Người hướng dẫn khoa học:

Người hướng dẫn 1: TS. Ngô Mạnh Tiến, Viện Vật lý, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

Người hướng dẫn 2: TS. Ngô Duy Tân, Trung tâm Vũ trụ Việt Nam, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi giờ ..., ngày ... tháng ... năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Sự phát triển nhanh của robot và trí tuệ nhân tạo đã thúc đẩy việc ứng dụng rộng rãi các robot di động sử dụng bánh xe non-holonomic (NWMR) trong nhiều lĩnh vực như giao thông thông minh, logistics, sản xuất, nông nghiệp, y tế và quốc phòng. Tuy nhiên, trong quá trình vận hành thực tế, các hệ robot này thường phải đối mặt với các sai hỏng và bất định, trong đó lỗi truyền động là một trong những nguyên nhân chính làm suy giảm chất lượng điều khiển và độ chính xác bám quỹ đạo.

Các phương pháp hiện có về phát hiện lỗi và điều khiển chịu lỗi cho robot tự hành vẫn còn nhiều hạn chế, đặc biệt trong việc xử lý lỗi truyền động, khả năng hội tụ của bộ quan sát và sự tích hợp thông tin lỗi vào luật điều khiển. Vì vậy, việc nghiên cứu các phương pháp quan sát lỗi và điều khiển chịu lỗi hiệu quả cho robot di động non-holonomic là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy, tính tự chủ và hiệu quả vận hành của hệ thống robot tự hành.

Từ yêu cầu đó, NCS lựa chọn đề tài cho luận án: “*Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic*”.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là phát triển các phương pháp quan sát và điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic nhằm đảm bảo ổn định hệ thống và khả năng bám quỹ đạo chính xác trong điều kiện tồn tại lỗi truyền động, nhiễu và bất định mô hình.

Các mục tiêu cụ thể gồm:

- Phân tích và mô hình hóa ảnh hưởng của lỗi truyền động đến động học, động lực học và sai số bám quỹ đạo của robot.
- Nghiên cứu và phát triển các phương pháp quan sát trạng thái và phát hiện lỗi phù hợp cho robot non-holonomic.
- Thiết kế và đánh giá bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi thông qua mô phỏng.

3. Nội dung nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu bài toán quan sát trạng thái, ước lượng lỗi truyền động và điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic.

Nội dung chính bao gồm: Xây dựng mô hình động học mở rộng của robot có xét đến lỗi truyền động và nhiễu chưa biết; Phân tích cơ chế ảnh hưởng của lỗi truyền động đến vận tốc và sai số bám quỹ đạo của robot; Nghiên cứu và cải tiến bộ quan sát lỗi phi tuyến để ước lượng trạng thái chưa đo và tái tạo tín hiệu lỗi; Thiết kế bộ điều khiển chịu lỗi dựa trên thông tin lỗi ước lượng nhằm bù lỗi truyền động và đảm bảo ổn định hệ thống; Tích hợp bộ quan sát và bộ điều khiển thành hệ thống hoàn chỉnh và đánh giá hiệu quả bằng mô phỏng.

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào robot di động hai bánh chủ động, xét lỗi truyền động, kiểm chứng bằng mô phỏng MATLAB/Simulink.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu kết hợp gồm:

- Phân tích lý thuyết: xây dựng mô hình toán học của hệ robot có xét đến lỗi truyền động và nhiễu.
- Thiết kế thuật toán: phát triển bộ quan sát lỗi phi tuyến và bộ điều khiển chịu lỗi dựa trên phân tích Lyapunov.
- Mô phỏng số: đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất trên nền tảng MATLAB/Simulink với các kịch bản lỗi khác nhau.

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

a. Ý nghĩa khoa học

Luận án góp phần bổ sung cơ sở lý thuyết cho bài toán quan sát và điều khiển chịu lỗi đối với hệ phi tuyến non-holonomic, thông qua: Xây dựng mô hình động học mở rộng có xét đến lỗi truyền động và nhiễu chưa biết; Phát triển và cải tiến các bộ quan sát lỗi nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng hội tụ của ước lượng; 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 robot.

b. Ý nghĩa thực tiễn

Các kết quả của luận án có thể: Nâng cao độ tin cậy và khả năng vận hành ổn định của robot khi xảy ra lỗi truyền động; Áp dụng trực tiếp cho các robot hai bánh trong logistics, robot dịch vụ và AGV công nghiệp; Tạo cơ sở cho việc phát triển các hệ robot có khả năng tự chẩn đoán và thích nghi với lỗi.

6. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đạt được một số đóng góp khoa học mới:

1. Luận án 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 bất định.
2. Xây dựng điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt, cho phép nâng cao tốc độ hội tụ và kiểm soát chặt hành vi quá độ của hệ.

7. Cấu trúc của luận án

Luận án gồm bốn chương chính, cùng với phần mở đầu và kết luận:

Chương 1: Tổng quan về quan sát trạng thái, phát hiện lỗi và điều khiển chịu lỗi cho robot di động non-holonomic

Chương 2: Phát triển bộ quan sát và phát hiện lỗi truyền động cho robot di động nonholonomic.

Chương 3: Kiến trúc điều khiển chịu lỗi phân tầng dựa trên bộ quan sát cho robot di động non-holonomic.

Chương 4: Điều khiển chịu lỗi với ràng buộc hiệu năng cho robot di động non-holonomic.

Phần kết luận tổng hợp các kết quả đạt được và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo. Cuối cùng là phần danh mục các công trình đã công bố và tài liệu tham khảo.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ QUAN SÁT TRẠNG THÁI, PHÁT HIỆN LỖI VÀ ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI CHO ROBOT DI ĐỘNG NON-HOLONOMIC

1.1 Giới thiệu về robot di động non-holonomic

NWMR là lớp robot tự hành có ràng buộc chuyển động không tích phân, trong đó robot không thể di chuyển tức thời theo mọi hướng do điều kiện lăn bánh không trượt theo phương ngang [1]. Nhờ cấu trúc cơ khí đơn giản và khả năng cơ động cao trong không gian hạn chế, NWMR được ứng dụng rộng rãi trong các hệ robot vận chuyển, kho vận và robot dịch vụ [2]. Về mặt mô hình, NWMR là hệ phi tuyến chịu ảnh hưởng của ràng buộc non-holonomic, tương tác bánh xe – mặt nền, trượt bánh, bất định tham số và nhiều môi trường [3]. Đồng thời, nhiều trạng thái của hệ không thể đo trực tiếp do hạn chế phần cứng, nên các bộ quan sát thường được dùng để ước lượng trạng thái và nhiễu chưa biết. Trong quá trình vận hành, lỗi có thể xuất hiện ở cơ cấu chấp hành, cảm biến hoặc thuật toán điều khiển [4]–[6]. Đặc biệt, lỗi truyền động ảnh hưởng trực tiếp đến vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của robot, có thể gây sai lệch quỹ đạo hoặc làm suy giảm ổn định của hệ thống nếu không được xử lý kịp thời [7]–[11].

Để nâng cao hiệu năng điều khiển cho robot, nhiều phương pháp điều khiển phi tuyến đã được nghiên cứu [20]–[23]. Nhằm cải thiện độ chính xác bám quỹ đạo và tính bền vững của hệ thống, kiến trúc điều khiển – quan sát được áp dụng [26]–[30]. Việc phát triển các phương pháp điều khiển–quan sát có khả năng phát hiện và bù lỗi theo thời gian thực vẫn là một hướng nghiên cứu quan trọng.

1.2 Tổng quan về các phương pháp điều khiển cho NWMR

Các phương pháp điều khiển cho NWMR đã phát triển từ điều khiển cổ điển đến các chiến lược phi tuyến và điều khiển chịu lỗi nhằm xử lý tính phi tuyến, ràng buộc non-holonomic và bất định mô hình của hệ thống. Bộ điều khiển tuyến tính như PID được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản, đặc biệt trong các hệ AGV công nghiệp [1], [2]. Tuy nhiên, do đặc tính phi tuyến và ảnh hưởng của nhiễu, trượt bánh và sai lệch truyền động, các phương pháp này thường suy giảm hiệu năng khi điều kiện vận hành thay đổi [1], [3]. Vì vậy, nhiều phương pháp điều khiển phi tuyến như backstepping, điều khiển trượt và điều khiển thích nghi đã được phát triển nhằm nâng cao tính bền vững của hệ thống [21]–[23]. Gần đây, điều khiển chịu lỗi (FTC) được nghiên cứu rộng rãi để đảm bảo hệ robot vẫn hoạt động ổn định khi xuất hiện lỗi truyền động. Các phương pháp FTC thường kết hợp bộ quan sát để ước lượng trạng thái, nhiễu và lỗi theo thời gian thực nhằm hỗ trợ bù lỗi trong luật điều khiển [6]–[9], [17]–[19]. Tuy nhiên, việc tách biệt rõ ràng giữa lỗi truyền động và nhiễu trong các hệ NWMR vẫn còn là vấn đề nghiên cứu mở.

1.3 Các phương pháp quan sát và phát hiện lỗi

Trong các hệ NWMR, nhiều biến trạng thái quan trọng như vận tốc bánh xe, mô-men truyền động hoặc nhiễu tổng hợp không thể đo trực tiếp do hạn chế cảm biến và điều kiện vận hành thực tế [1], [3], [30], [55]. Vì vậy, các bộ quan sát được dùng để ước lượng trạng thái và nhiễu từ tín hiệu đầu vào–đầu ra và mô hình danh định của hệ thống.

Các bộ quan sát tuyến tính như Luenberger observer và Kalman filter đặt nền tảng cho bài toán ước lượng trạng thái, trong khi các cấu trúc quan sát phi tuyến như HiGO, SMO, UIO, DO và ESO được phát triển nhằm nâng cao khả năng hội tụ và tính bền vững trong các hệ phi tuyến như NWMR [13], [28]. Ngoài ước lượng trạng thái, bộ quan sát còn được sử dụng trong phát hiện và chẩn đoán lỗi (FDD) thông qua tín hiệu dư, biểu diễn sai lệch giữa mô hình danh định và hệ thực [6], [37]. Tuy nhiên, hiệu quả của các phương pháp này phụ thuộc vào độ chính xác của mô hình và khả năng phân tách giữa lỗi và nhiễu chưa biết [4], [18], [57].

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

Việc kết hợp bộ quan sát và bộ điều khiển trở thành hướng tiếp cận quan trọng nhằm nâng cao hiệu năng điều khiển và khả năng giám sát hệ thống [13], [26], [28], [55]. Một hướng phổ biến là sử dụng trạng thái ước lượng từ bộ quan sát trong các luật điều khiển phi tuyến [20]–[23], [60]. Ngoài ra, các bộ quan sát được sử dụng để ước lượng và bù bất định theo thời gian thực [19], [29]. Tuy nhiên, trong nhiều nghiên cứu, lỗi truyền động thường được gộp vào nhiễu tổng hợp thay vì được tách biệt và quan sát tường minh. Bên cạnh đó, FTC cho NWMR được phát triển theo điều khiển chịu lỗi thụ động (PFTC) và điều khiển chịu lỗi chủ động (AFTC), trong đó AFTC sử dụng bộ quan sát để phát hiện và bù lỗi theo thời gian thực [6]–[9]. Mặc dù đã đạt nhiều tiến bộ, việc xây dựng kiến trúc điều khiển–quan sát tích hợp có khả năng tách biệt lỗi truyền động và đảm bảo hiệu năng bám quỹ đạo vẫn là một hướng nghiên cứu quan trọng [8], [26], [29].

1.5 Khoảng trống nghiên cứu của luận án

Từ tổng quan các nghiên cứu về điều khiển và quan sát cho NWMR có thể thấy rằng nhiều phương pháp điều khiển phi tuyến như điều khiển trượt và điều khiển thích nghi đã được phát triển nhằm đảm bảo ổn định và bám quỹ đạo trong điều kiện bất định và nhiễu [21], [23], [40], [43]. Tuy nhiên, trong phần lớn các nghiên cứu, lỗi truyền động thường được xem như nhiễu tổng hợp hoặc sai lệch tham số, dẫn đến khả năng bù lỗi còn hạn chế khi xảy ra suy giảm hiệu suất cơ cấu chấp hành [7], [8].

Một số nghiên cứu về AFTC đã sử dụng bộ quan sát để hỗ trợ phát hiện và bù lỗi [6]–[9], trong đó lỗi truyền động thường được xử lý gián tiếp thông qua trạng thái mở rộng hoặc cơ chế thích nghi. Các bộ quan sát được sử dụng như ESO hay DO nhằm bù bất định tổng hợp thay vì tách biệt lỗi truyền động [19], [29]. Ngoài ra, kiến trúc điều khiển - quan sát và chiến lược hội tụ hữu hạn thời gian đã được nghiên cứu trong [24], [36], [41]. Tuy nhiên việc tích hợp đồng thời các yếu tố này trong một khung điều khiển chịu lỗi với hiệu năng quy định trước cho NWMR chưa được đề cập. Do đó, luận án đề xuất phát triển kiến trúc điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát, trong đó lỗi truyền động được ước lượng tường minh và tích hợp với cấu trúc điều khiển phân tầng nhằm nâng cao hiệu năng bám quỹ đạo của robot.

1.6 Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về NWMR, các phương pháp điều khiển bám quỹ đạo, điều khiển chịu lỗi và các hướng tiếp cận kết hợp bộ quan sát – điều khiển trong điều kiện tồn tại nhiễu, bất định mô hình và lỗi truyền động. Qua phân tích các

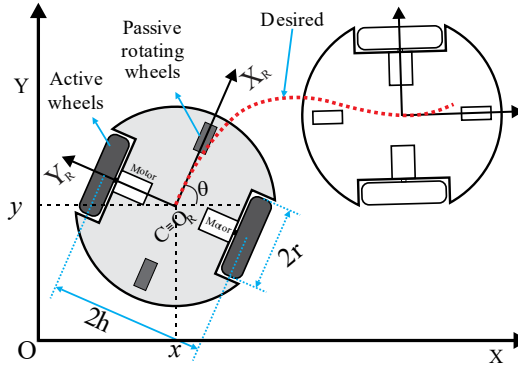
công trình nghiên cứu tiêu biểu, chương này làm rõ đặc điểm phi tuyến của hệ NWMR và những thách thức trong thiết kế điều khiển dựa trên quan sát.

Kết quả khảo sát cho thấy phần lớn các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào nâng cao tính bền vững trước nhiễu và bất định mô hình, trong khi lỗi truyền động thường được xử lý gián tiếp như một thành phần của nhiễu tổng hợp. Ngoài ra, mặc dù các kiến trúc điều khiển phân tầng động học – động lực học đã được đề xuất, việc tích hợp bộ quan sát trong các cấu trúc này vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Đồng thời, các yêu cầu hiệu năng mạnh như hội tụ hữu hạn thời gian hoặc ràng buộc hiệu năng bám quỹ đạo định trước vẫn chưa được tích hợp một cách hệ thống trong các chiến lược điều khiển chịu lỗi cho NWMR

CHƯƠNG 2. PHÁT TRIỂN BỘ QUAN SÁT VÀ PHÁT HIỆN LỖI TRUYỀN ĐỘNG CHO ROBOT DI ĐỘNG NON-HOLONOMIC

2.1 Mô hình toán học của robot di động non-holonomic có lỗi truyền động

Vị trí và trạng thái của robot trong hệ tọa độ quán tính được biểu diễn bởi vector $q = [x, y, \theta]^T$, trong đó x, y là tọa độ của tâm robot và θ là góc định hướng.



Hình 2.1. Cấu trúc robot di động non-holonomic

Mô hình động học của robot:

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

Mô hình sai số bám quỹ đạo của robot được biểu diễn:

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

Quỹ đạo tham chiếu $q_{\text{ref}} = [x_{\text{ref}} \ y_{\text{ref}} \ \theta_{\text{ref}}]^T$, x_e, y_e, θ_e là sai lệch vị trí.

Vận tốc tham chiếu được mô hình hóa dưới dạng:

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

Mô hình động lực học sai số bám trở thành:

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

trong đó $\Delta v, \Delta \omega$ là các thành phần lỗi truyền động chưa biết

Động lực học của robot:

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

Mô hình động lực học được rút gọn:

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

với $\vartheta = [v, \omega]^T$, D_r là nhiễu tổng hợp

Sau khi chuẩn hóa, mô hình 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 thực tế, tín hiệu điều khiển tác động lên động cơ có thể bị suy giảm hoặc sai lệch. Do đó tín hiệu thực tế được mô hình hóa bởi:

$$u_i^f(t) = \alpha_i u_i(t) + \Delta u_i(t) \quad (2.27)$$

trong đó $u_i(t)$ là tín hiệu điều khiển danh định, $u_i^f(t)$ 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, $\Delta u_i(t)$ biểu diễn nhiễu chưa biết hoặc lỗi phụ không được mô hình hóa chính xác.

Thay vào mô hình động lực học thu được:

$$\dot{\vartheta} = B_f u + D_f \quad (2.30)$$

trong đó B_f phản ánh sự thay đổi cấu trúc đầu vào do lỗi truyền động và D_f là nhiễu gộp mở rộng.

Giả thiết 2.1. Giả sử rằng các thành phần nhiễu gộp và lỗi truyền động là bị chặn:

$$|D_v| \leq \zeta_1, |D_\omega| \leq \zeta_2 \quad (2.31)$$

trong đó ζ_1, ζ_2 là các hằng số dương hữu hạn nhưng chưa biết.

Giả thiết 2.2. Lỗi truyền động tác động lên hệ thống thông qua cùng kênh với tín hiệu điều khiển, tức là lỗi xuất hiện trong không gian ảnh hưởng của ma trận B_f . Cụ thể, từ (2.18)–(2.20) có thể thấy rằng lỗi truyền động ảnh hưởng trực tiếp đến v và ω thông qua các hệ số k_i , cùng cấu trúc với tín hiệu điều khiển.

Giả thiết 2.3. Giả sử rằng các thành phần lỗi và nhiễu gộp biến thiên chậm:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{D}_v = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{D}_\omega = 0 \quad (2.32)$$

2.2. Thiết kế bộ quan sát trạng thái và lỗi truyền động

2.2.1. Bộ quan sát lỗi truyền động

Phương trình động lực học sai lệch bám (2.8) có thể được viết lại dưới dạng:

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

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} v_d \cos \theta_e - v \\ \omega_d - \omega \end{bmatrix}, f(z) = \begin{bmatrix} y_e \omega_d \\ v_d \sin \theta_e - x_e \omega_d \\ 0 \end{bmatrix}, g_1(z) = g_2(z) = \begin{bmatrix} 1 & -y_e \\ 0 & x_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; F_a = \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \end{bmatrix}$$

Trên cơ sở nghiên cứu [19], bộ quan sát lỗi được xây dựng:

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

Trong đó: $\hat{F}_a$ là giá trị ước lượng của lỗi truyền động, $L(z)$ 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.

Ký hiệu $e_f = F_a - \hat{F}_a$, giả sử rằng F_a biến thiên chậm, tức là $\dot{F}_a \approx 0$.

$$\dot{e}_f = -\dot{z}_p - \dot{p}(z) = -L(z)g_2(z)e_f \quad (2.36)$$

Bằng cách lựa chọn thích hợp hàm phi tuyến $\dot{p}(z)$ và ma trận khuếch đại $L(z)$, sai số ước lượng e_f sẽ hội tụ tiệm cận về không [62].

2.2.2. Thiết kế bộ quan sát lỗi truyền động cải tiến

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 phụ thuộc thời gian.

$$L(t) = (1 - e^{-t/\tau_L})L_0, K(t) = 1 - e^{-(t/T_{init})^2} \quad (2.38)$$

với L_0 là ma trận danh định, τ_L là hằng số thời gian, T_{init} là khoảng thời gian *warm-up*.

$\hat{F}_a$ được làm trơn và sử dụng cho mục đích bù lỗi trong bộ điều khiển:

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

Giả thiết 2.4. Các hàm f, g_1, g_2, p là trơn và bị chặn trên miền làm việc, nghĩa là tồn tại $F, G_1, G_2, P, \dot{P}$ sao cho $\|f(x_e)\| \leq F, \|g_1(x_e)\| \leq G_1, \|g_2(x_e)\| \leq G_2, \|p(x_e)\| \leq P, \|\dot{p}(x_e)\| \leq \dot{P}$; $F_a(t), \dot{F}_a(t)$ bị chặn: $\|F_a(t)\| \leq \chi_1, \|\dot{F}_a(t)\| \leq \chi_2$ với $\chi_1, \chi_2 > 0$; Ma trận L_0 danh định và $\underline{\lambda}_L I \preceq L(t) \preceq \bar{\lambda}_L I, 0 < \underline{\lambda}_L \leq \bar{\lambda}_L < \infty, \forall t \geq 0$; $K(t)$ là hàm liên tục, không giảm, thỏa mãn $K(0) = 0$ và $\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = 1$; 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 2.4, sai số ước lượng lỗi của bộ quan sát (2.36) là bị chặn cuối cùng đồng đều (UUB). Hơn nữa, nếu nhiều 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.

2.2.3. Thiết kế bộ quan sát trạng thái mở rộng

Bộ quan sát trạng thái mở rộng được đề xuất:

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

trong đó $\hat{v}, \hat{\omega}$ là các ước lượng của vận tốc; $\hat{D}_v, \hat{D}_\omega$ là các ước lượng của nhiễu gộp; $\hat{e}_v = \hat{v} - v, \hat{e}_\omega = \hat{\omega} - \omega$ là sai số ước lượng vận tốc; $\hat{e}_{D_v} = \hat{D}_v - D_v, \hat{e}_{D_\omega} =$

$\widehat{D}_\omega - D_\omega$ là sai số ước lượng nhiễu; $\rho_1, \rho_2 > 0$ là các hệ số khuếch đại. Hàm $fal(.)$ được sử dụng nhằm cải thiện khả năng hội tụ và giảm nhiễu đo [36], [63]:

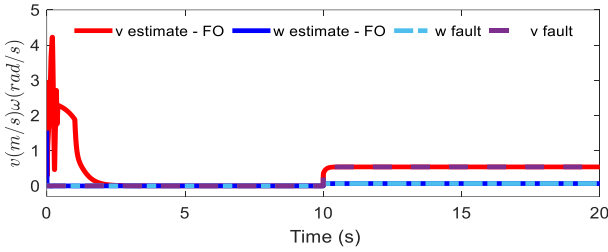
$$fal(\hat{e}_i) = \begin{cases} \frac{\hat{e}_i}{\gamma^{1-\alpha}} & \text{if } |\hat{e}_i| \leq \gamma \\ |\hat{e}_i|^\alpha \text{sign}(\hat{e}_i) & \text{if } |\hat{e}_i| > \gamma \end{cases}, i = (v, \omega) \quad (2.51)$$

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

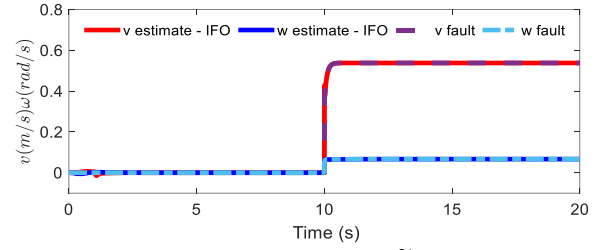
Định lý 2.2. Xét mô hình động lực học vận tốc của NWMR được cho bởi (2.29) và bộ quan sát trạng thái mở rộng được thiết kế theo (2.48). Giả sử Giả thiết 2.1, 2.4 được thỏa mãn. Khi đó, tồn tại $\rho_1, \rho_2 > 0$ và băng thông bộ quan sát Λ sao cho các sai số ước lượng trạng thái và nhiễu gộp $\hat{e}_v, \hat{e}_\omega, \hat{e}_{D_v}, \hat{e}_{D_\omega}$ là UUB. Thì các sai số ước lượng của bộ quan sát hội tụ tiệm cận về không:

2.3. Mô phỏng kiểm chứng các bộ quan sát

a) Tín hiệu quan sát trên FO và IFO

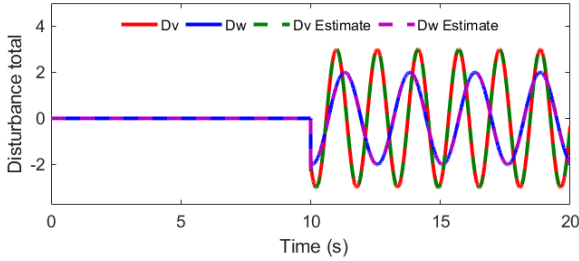


Hình 2.3. Ước tính lỗi từ FO

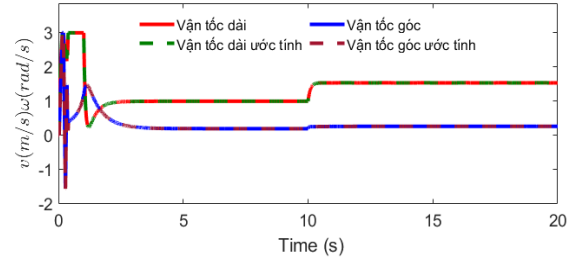


Hình 2.4. Ước tính lỗi từ IFO

b) Tín hiệu quan sát trên ESO



Hình 2.5. Ước tính nhiễu từ ESO



Hình 2.6. Ước tính vận tốc từ ESO

2.5. 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 phát hiện lỗi truyền động trong NWMR. Trước hết, các mô hình động học và động lực học có xét đến lỗi truyền động 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 truyền động và bộ quan sát trạng thái mở rộng, cho phép phân tách hiệu quả giữa lỗi actuator và nhiễu gộp chưa biết.

CHƯƠNG 3. KIẾN TRÚC ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI PHÂN TẦNG DỰA TRÊN CÁC BỘ QUAN SÁT CHO ROBOT DI ĐỘNG NON-HOLONOMIC

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

3.1.1. Bộ điều khiển động học bám quỹ đạo

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:

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

Lấy đạo hàm theo thời gian của (3.1) và kết hợp với (2.3), ta thu được:

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

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{\Delta l} & \frac{\cos \theta}{\Delta l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}; (\dot{x}_1 = u_1, \dot{y}_1 = u_2) \quad (3.3)$$

Tín hiệu điều khiển bám quỹ đạo được chọn:

$$\begin{cases} u_1 = \dot{x}_{1d} + k_1(x_{1d} - x_1) \\ u_2 = \dot{y}_{1d} + k_1(y_{1d} - y_1) \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$\begin{cases} v = k_1 e_{1x} \cos \theta + k_2 e_{1y} \sin \theta + \dot{x}_1 \cos \theta + \dot{y}_1 \sin \theta \\ \omega = \frac{1}{\Delta l} (-k_1 e_{1x} \sin \theta + k_2 e_{1y} \cos \theta + \dot{x}_1 \sin \theta + \dot{y}_1 \cos \theta) \end{cases} \quad (3.5)$$

trong đó $e_1 = [x_{1d} - x_1 \quad y_{1d} - y_1]^T$ là vectơ sai lệch bám.

Mô hình động lực học được xem xét:

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

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:

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

Trong đó, $\Delta \tau = [\Delta \tau_1 \quad \Delta \tau_2]^T$ biểu diễn lỗi cơ cấu chấp hành tác động lên robot di động. Do ảnh hưởng của các lỗi này, các giá trị của vận tốc tuyến tính v và vận tốc góc ω sẽ bị thay đổi bởi các đại lượng không xác định lần lượt là $\Delta v(t)$ và $\Delta \omega(t)$.

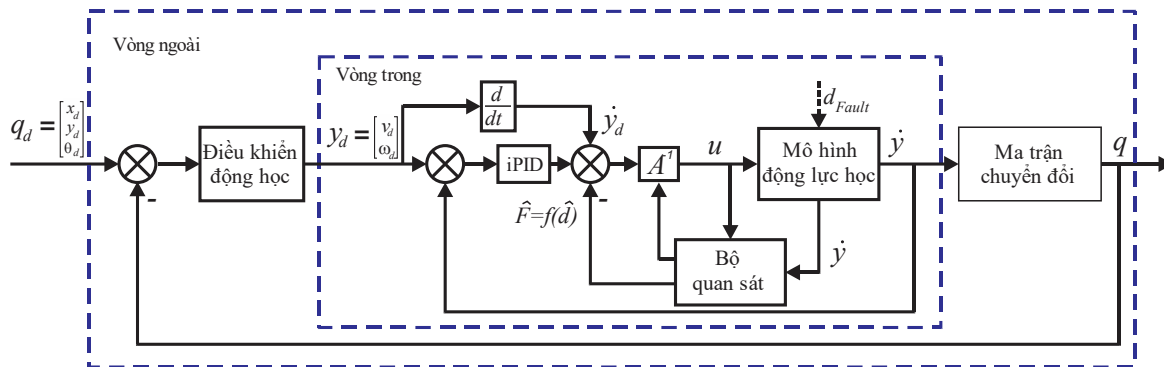
3.1.2. Bộ điều khiển động lực học dựa trên i-PID và điều khiển phi mô hình

Theo lý thuyết điều khiển phi mô hình (MFC) [71], Hệ động lực học trong (3.7) được biểu diễn dưới dạng:

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

Theo [72], với A khả nghịch, tín hiệu điều khiển theo luật i-PID được xác định:

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



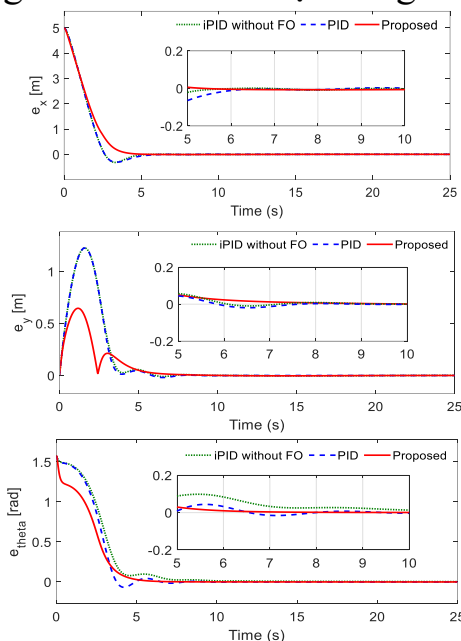
Hình 3.2. Cấu trúc bộ điều khiển MFC-iPID đề xuất

Định lý 3.1: Hệ động lực học được mô tả bởi (3.9), kết hợp với ước lượng lỗi $\hat{F}$ từ bộ quan sát (2.35) là ổn định tiệm cận và sai lệch bám hội tụ về không dưới luật điều khiển MFC-iPID trong (3.10).

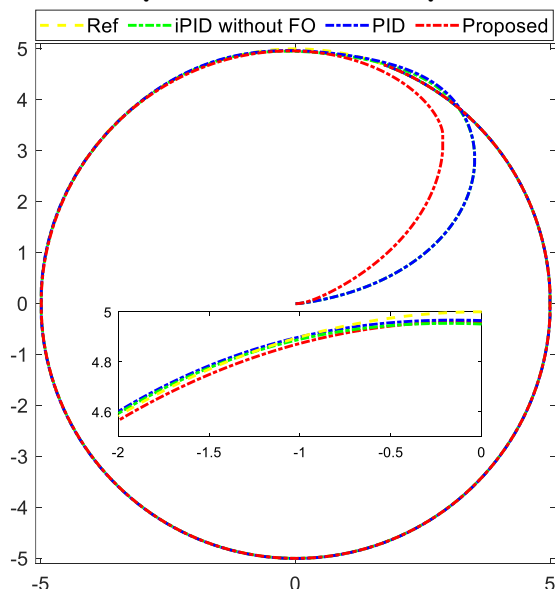
3.2. Kết quả mô phỏng

➤ *Trường hợp 1:* Điều kiện không có lỗi cơ cấu chấp hành.

Hình 3.4, 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.



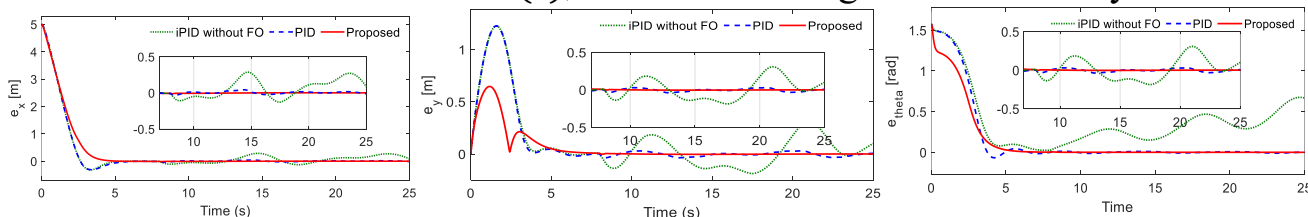
Hình 3.4. Sai lệch bám quỹ đạo



Hình 3.5. Quỹ đạo bám của các bộ điều khiển trong trường hợp 1.

➤ *Trường hợp 2:*

Trong kịch bản thứ hai, lỗi cơ cấu chấp hành được đưa vào hệ thống tại thời điểm $t = 8 \text{ s}$ với $\Delta v = 0.25v \sin(t)$, $\Delta \omega = 0.3\omega$ đồng thời m và I thay đổi 10%.

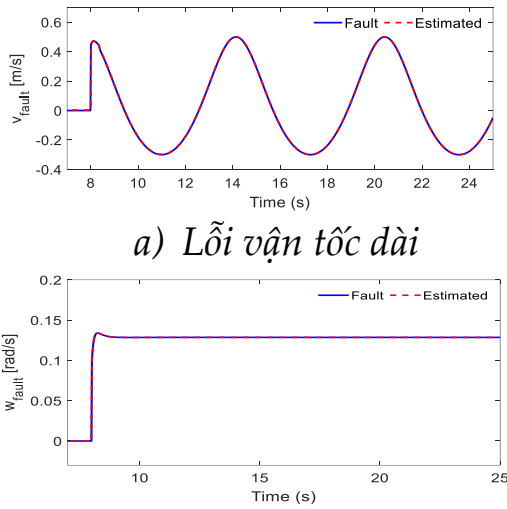


Hình 3.6. Sai lệch bám của các bộ điều khiển khi có lỗi truyền động

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 khác có sai số lớn hơn.

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 sau khi lỗi

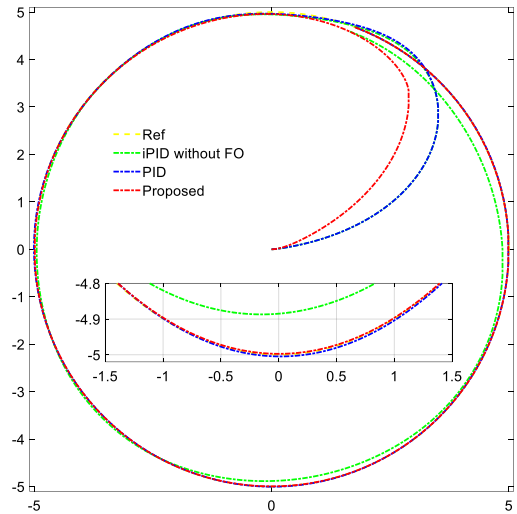
được đưa vào hệ thống. Việc ước lượng chính xác này cho phép bù lỗi hiệu quả trong vòng điều khiển trong. Hình 3.9 xác nhận rằng bộ điều khiển đề xuất vẫn duy trì được độ chính xác bám quỹ đạo cao.



a) Lỗi vận tốc dài

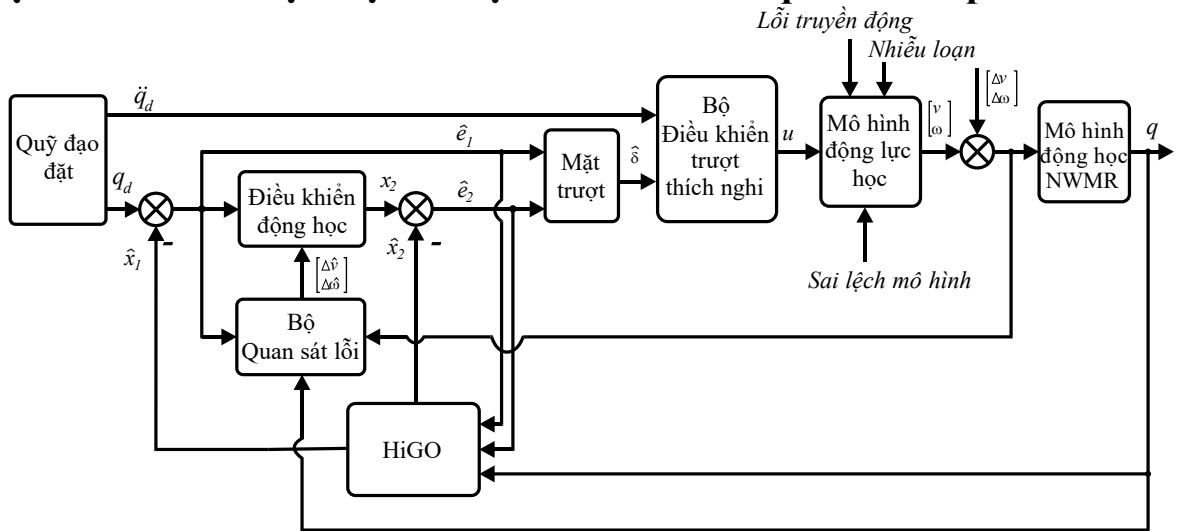
b) Lỗi vận tốc góc

Hình 3.8. Ước tính lỗi trên NWMR



Hình 3.9. Quỹ đạo bám của robot ở trường hợp 2

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



Hình 3.10. Cấu trúc của bộ điều khiển DOA-SMC.

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

Đặt $z_1 = [x \ y \ \theta]^T$, $z_2 = [v \ \omega]^T$, khi đó hệ thống NWMR được biểu diễn:

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

Bộ quan sát mở rộng hệ số khuếch đại cao được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = S\hat{z}_2 - \frac{\gamma_2}{\varepsilon} \hat{e}_{z_1} \\ \dot{\hat{z}}_2 = S^\dagger \left(-\frac{\gamma_1}{\varepsilon^2} \hat{e}_{z_1} \right) \end{cases} \quad (3.16)$$

trong đó $\hat{z}_1$ và $\hat{z}_2$ lần lượt là các giá trị ước lượng của z_1 và z_2 ; γ_1, γ_2 được lựa chọn sao cho phần thực của các trị riêng của $s^2 + \gamma_2 s + \gamma_1 = 0$ là âm

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

a) Luật điều khiển động học

Luật điều khiển động học cho robot được đề xuất trên cơ sở mô hình sai số bám quỹ đạo của robot dưới ảnh hưởng của lỗi truyền động và bộ quan sát lỗi trong (2.37).

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

b) Luật điều khiển động lực học

Đặt $z_{1d} = q_d$, $z_{2d} = [v_d \ \omega_d]^T$, $e_{z_1} = z_1 - z_{1d}$, $e_{z_2} = z_2 - z_{2d}$.

Luật điều khiển được thiết kế:

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

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

Luật điều khiển được sửa đổi với hệ số chuyển mạch thích nghi $\hat{\lambda}_{sw}$:

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

Đặt $e_\lambda = \lambda_{sw} - \hat{\lambda}_{sw}$, luật điều khiển SMC-PI dựa trên HiGO cuối cùng được đề xuất:

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

trong đó $\xi > 0$ là một hằng số đủ nhỏ đảm bảo tính ổn định bền vững.

3.2.3. Phân tích ổn định

Bổ đề 3.1: Xét hệ kín dưới luật điều khiển trượt có hỗ trợ quan sát kép được đề xuất. Giả sử rằng sai số ước lượng lỗi chấp hành và sai số ước lượng nhiễu đều bị chặn bởi các hằng số dương đã biết. Khi đó, với bất kỳ giá trị hệ số mặt trượt nào cho trước, có thể lựa chọn các tham số điều khiển sao cho động học sai số bám quỹ đạo là UUB.

Định lý 3.2: Xét hệ NWMR được mô tả bởi phương trình động lực học sai số bám (2.8) với bộ quan sát lỗi (2.37), và luật điều khiển được xác định như trong phương trình (3.25). Dưới các giả thiết và phạm vi nêu trong tiêu mục 2.1.4, hệ kín là ổn định tiệm cận toàn cục. Các sai số bám x_e , y_e và θ_e hội tụ về 0 khi $t \rightarrow \infty$.

Định lý 3.3: Xét hệ NWMR trong (3.26) và bộ quan sát khuếch đại cao mở rộng được định nghĩa bởi (3.16). Giả sử luật điều khiển trượt được cho bởi (3.31), trong đó sai số quan sát χ là đủ nhỏ nhờ sự hội tụ của bộ quan sát như đã chứng minh trong 2.2.2. Khi đó, hệ kín là ổn định tiệm cận toàn cục, các sai số bám δ hội tụ về một lân cận của gốc, với kích thước phụ thuộc vào hệ số khuếch đại quan sát ε .

Bổ đề 3.2: Xét bộ HiGO được mô tả bởi (3.16), với sai số quan sát chuẩn hóa được định nghĩa trong (3.17) và động học sai số (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

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

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

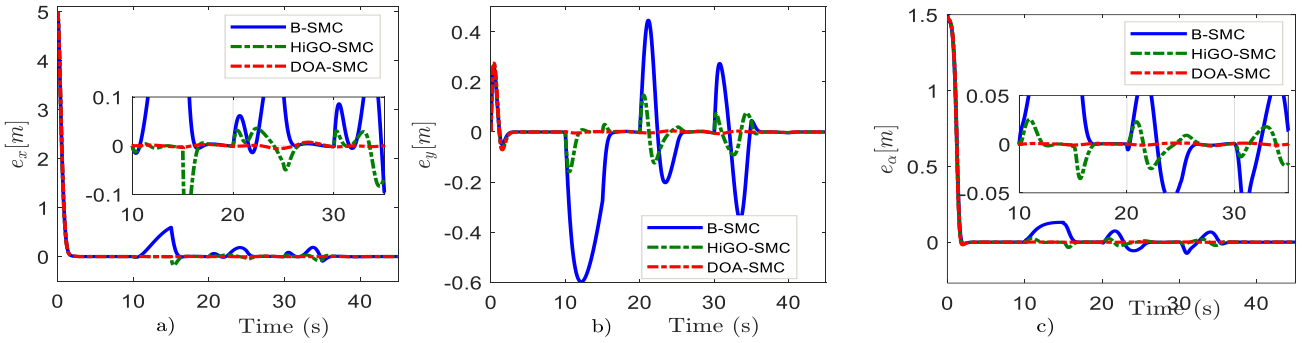
$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|z_2 - \hat{z}_2\| \leq \varepsilon \bar{\chi} \quad (3.39)$$

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.

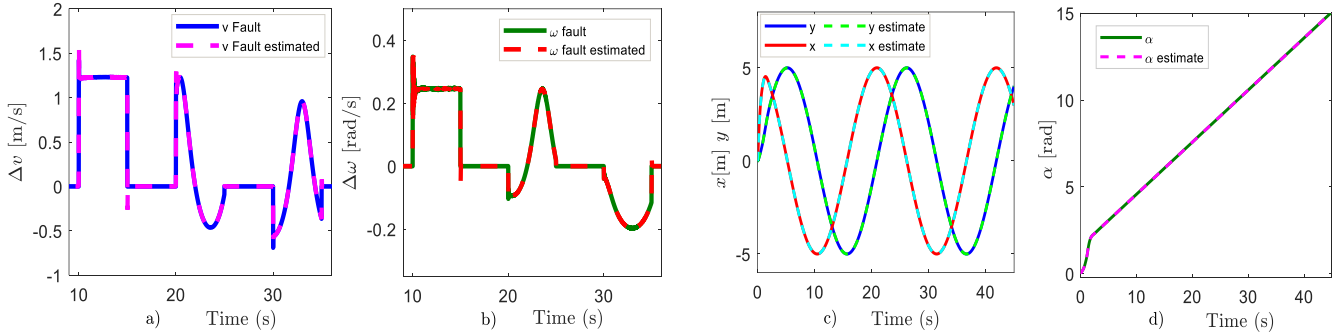
Định lý 3.4: Xét NWMR được mô tả bởi (3.15), trong đó nhiễu gộp $D(t)$ bị chặn bởi $\|D(t)\| \leq \gamma_d$. Giả sử bộ quan sát lỗi và HiGO được thiết kế theo (2.37), (3.16), và luật điều khiển trượt thích nghi (3.31) được triển khai. Khi đó, toàn bộ hệ kín, bao gồm các sai số bám quỹ đạo, sai số ước lượng nhiễu và sai số ước lượng lỗi, là UUB.

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

Từ 10s đến 15s, đầu ra của cơ cấu chấp hành bị suy giảm hiệu suất cố định 45%, với $\Delta v(t) = 0.45v, \Delta \omega(t) = 0.45\omega$; Từ 20s đến 25s, cơ cấu chấp hành chịu suy giảm dạng hình sin với: $\Delta v(t) = 0.45v \sin(t), \Delta \omega(t) = 0.45\omega \cos(t + \pi/2)$; Từ 30s đến 35s, một lỗi lệch được đưa vào: $\Delta v(t) = 0.45v - 0.15, \Delta \omega(t) = 0.45\omega - 0.15$. Nhiễu ngoài $Dis = [3\sin(t) \quad 2\cos(t)]^T$ ảnh hưởng lên hệ thống từ 10s đến 35s. Sai số tham số mô hình $m = 69.263 + 7\eta_R, I = 4.729 + 0.5\eta_R$ với $0 < \eta_R < 1$.

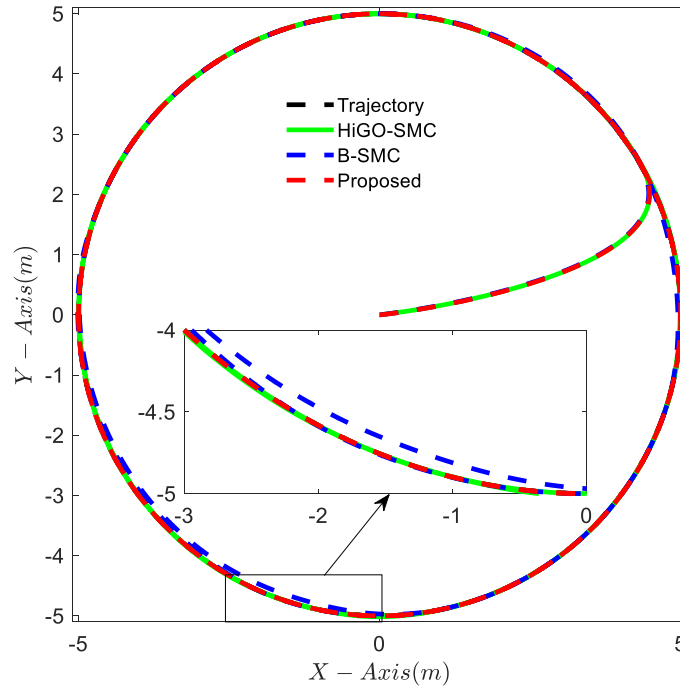


Hình 3.11. Sai lệch bám trạng thái: (a) x_e ; (b) y_e ; (c) θ_e



Hình 3.13. Ước lượng từ các bộ quan sát: (a) lỗi vận tốc dài; (b) lỗi vận tốc góc; (c) vị trí theo trục X và Y ; (d) góc định hướng.

Hình 3.11–3.14 trình bày so sánh hiệu năng của ba bộ điều khiển dưới các điều kiện lỗi cơ cấu chấp hành khác nhau. Kết quả cho thấy bộ điều khiển DOA–SMC đạt độ chính xác bám tốt nhất trên các trục x, y và góc hướng θ . Đối với điều khiển hướng, DOA–SMC đạt RMSE = 0.2176 và IAE = 1.7231, tốt hơn so với B–SMC (RMSE = 0.2216, IAE = 2.7377), trong khi HiGO–SMC cho hiệu năng trung gian nhưng có quá độ lớn hơn khi xảy ra lỗi LoE.



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

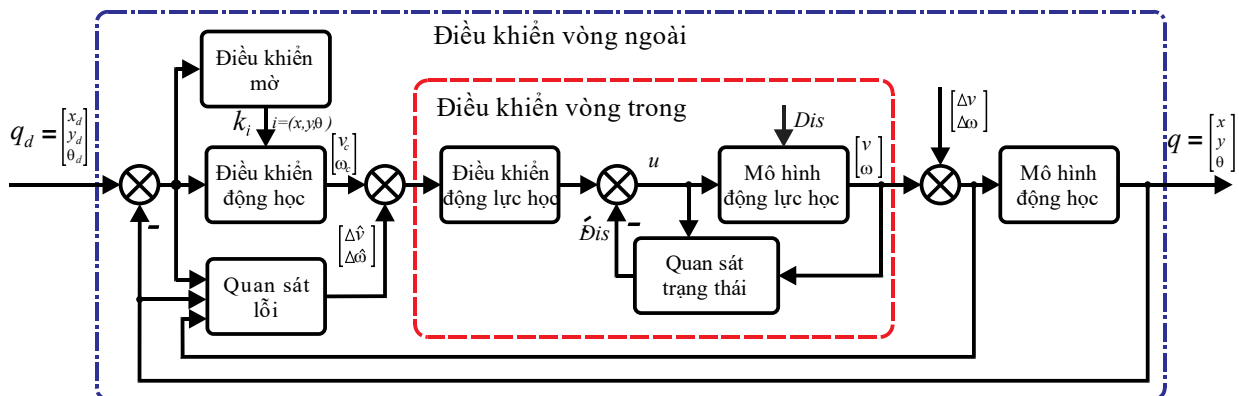
Tín hiệu điều khiển của DOA–SMC phản ứng nhanh sau khi lỗi xuất hiện, giúp sai số hội tụ nhanh mà không gây bão hòa cơ cấu chấp hành, đồng thời duy trì mức nỗ lực điều khiển thấp nhất. Các chỉ số định lượng cho thấy DOA–SMC giảm RMSE vị trí khoảng 10% và giảm IAE tới 63.8% so với B–SMC, chứng minh hiệu quả của cấu trúc quan sát kép trong việc nâng cao độ chính xác và khả năng chịu lỗi.

Bảng 3.5. – 3.6: Chỉ số hiệu năng bám đối với sai số

CHỈ SỐ	DOA-SMC		B-SMC		HiGO-SMC	
	Hướng	Euclide tổng	Hướng	Euclide tổng	Hướng	Euclide tổng
MSE	0.0474	0.2134	0.0491	0.2648	0.0474	0.2648
MAE	0.0383	0.0663	0.0608	0.1831	0.0423	0.1831
RMSE	0.2176	0.4620	0.2216	0.5146	0.2177	0.5146
IAE	1.7231	2.9851	2.7377	8.2424	1.9041	8.2424
ISE	2.1316	9.6068	2.2100	11.9197	2.1323	11.9197

3.3. Bộ điều khiển thích nghi chịu lỗi trên cơ sở bộ quan sát phân tầng điều khiển

3.3.1. Bộ điều khiển tầng động lực học dựa trên ASMC-ESO



Hình 3.15. Cấu trúc bộ điều khiển đề xuất

Cấu trúc của bộ điều khiển vòng trong 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.

Nhận xét 3.1: Trong nghiên cứu này, bề mặt trượt tỉ lệ - tích phân (PI) được lựa chọn do khả năng cải thiện độ chính xác ở trạng thái xác lập trong khi vẫn duy trì tính bền vững trước các nhiễu bên ngoài. Mặc dù các thiết kế bề mặt khác như bề mặt trượt đầu cuối hoặc bề mặt động có thể mang lại các lợi ích bổ sung, bề mặt PI cung cấp một sự đánh đổi hợp lý giữa đơn giản trong triển khai và độ bền vững thực tiễn.

a. SMC-PI

Theo [70], một bề mặt trượt dạng PI được đề xuất cho điều khiển trượt:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_v + k_v \int e_v dt \\ e_\omega + k_\omega \int e_\omega dt \end{bmatrix}, (k_v, k_\omega > 0) \quad (3.48)$$

trong đó $e_v = v_{ref} - v$; $e_\omega = \omega_{ref} - \omega$, $[v_{ref} \ \omega_{ref}]^T$ là vận tốc mong muốn.

Luật điều khiển tương đương được đề xuất:

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

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

Luật điều khiển chuyển mạch được xây dựng:

$$u_{sw} = \begin{bmatrix} k_{sw1} \text{sign}(\sigma_1) \\ k_{sw2} \text{sign}(\sigma_2) \end{bmatrix}, (k_{sw1}, k_{sw2} > 0) \quad (3.52)$$

Nhận xét 3.2: Để giảm hiện tượng rung (chattering), $\text{sign}(\cdot)$ được thay thế bằng hàm $\tanh(\cdot)$. Bộ điều khiển SMC-PI đề xuất:

$$u_{SMC} = u_{eq} + u_{sw} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1} (k_v e_v + \dot{v}_{ref} - k_2 v - \hat{d}_1) + k_{sw1} \tanh(\sigma_1) \\ \frac{1}{k_3} (k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_{ref} - k_4 \omega - \hat{d}_2) + k_{sw2} \tanh(\sigma_2) \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

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 ($\sigma = 0$) đạt được trong một khoảng thời gian hữu hạn, ngay cả khi tồn tại ảnh hưởng của nhiễu.

3.3.2. Bộ điều khiển vòng ngoài trên cơ sở kết hợp thích ứng mờ và IFO

Dựa trên vận tốc mong muốn $[v_{ref} \ \omega_{ref}]^T$ vị trí tham chiếu của NWMR được tính toán thông qua phương trình động học. Luật điều khiển vòng động học đề xuất:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ref} C \theta_e + k_x x_e + \Delta v \\ \omega_{ref} + k_y v_r y_e + k_\theta S \theta_e + \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Trong (3.71) hai nhiệm vụ thiết kế bao gồm: 1) Sử dụng bộ quan sát lỗi cải tiến (2.37) để ước lượng thành phần $F_a = [\Delta v \ \Delta \omega]^T$; 2) tự động cập nhật thích ứng các giá trị dương phù hợp cho k_x, k_y, k_θ thông qua các luật mờ trên Bảng 3.7, 3.8 và 3.9.

Bảng 3.7. 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 3.8. 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 3.9. Giá trị tham số cho k_θ

k_x		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

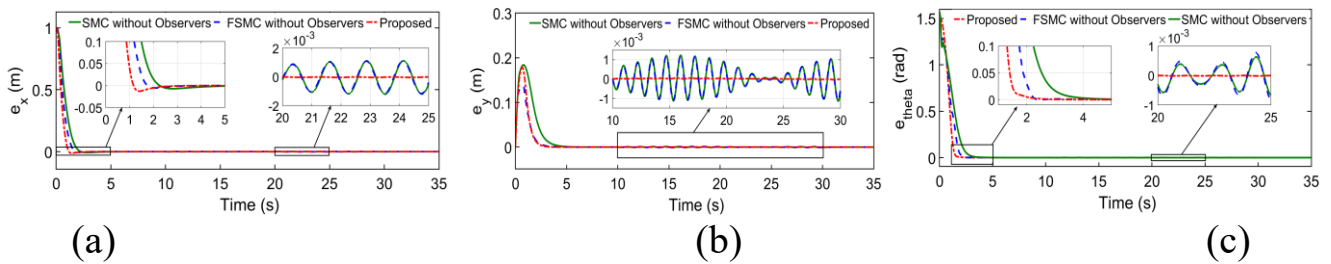
Định lý 3.6. Xét mô hình động học trong (2.4) dưới tác động của lỗi cơ cấu chấp hành. Khi sử dụng luật điều khiển (3.71) và bộ quan sát lỗi cải tiến (2.37), các sai số bám theo vị trí và góc lại của robot (e_q) hội tụ về 0 và luôn bị chặn.

Nhận xét 3.3. 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.

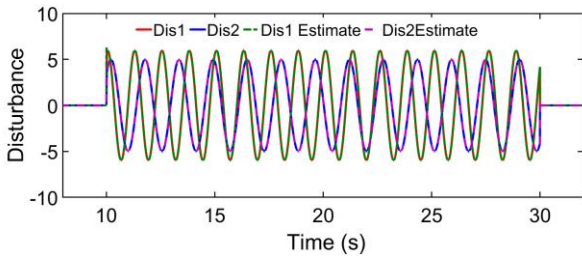
3.3.3. Kết quả mô phỏng, nhận xét và đánh giá

Trường hợp 1: Robot chuyển động theo quỹ đạo tròn khi có nhiễu loạn nhưng không có lỗi cơ cấu chấp hành

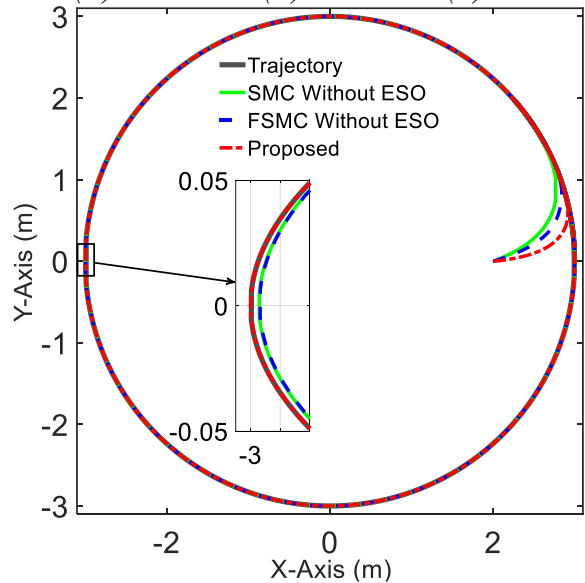
$$\begin{bmatrix} D_v \\ D_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6\sin(5t + \pi/2) \\ 5\cos(4t + \pi) \end{bmatrix} \quad (3.78)$$



Hình. 3.19. Sai lệch bám theo vị trí của robot (a) X-axes; (b) Y-axes; (c) theta



Hình 3.21. Ước tính tổng nhiễu trên ESO

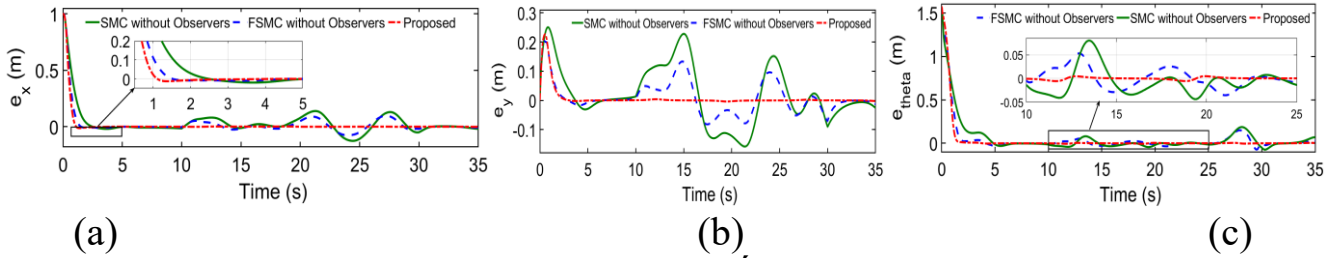


Hình 3.22. Quỹ đạo của robot tương ứng với các bộ điều khiển

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 tính 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 lỗi theo trục x, trục y và (thể hiện trong Hình 3.19 (a), (b) và (c)). Điều chỉnh vận tốc tuyến tính và vận tốc góc thích hợp trong Hình 3.20 (a) và 3.20 (b) tương ứng với các dạng quỹ đạo này.

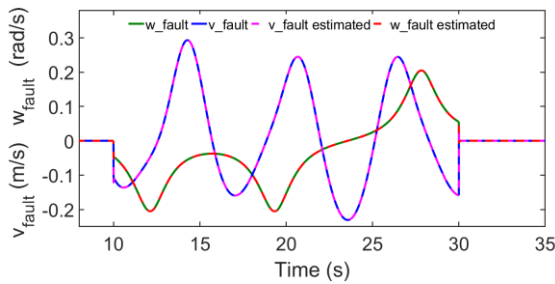
Trường hợp 2. Robot chuyển động theo quỹ đạo hình số 8 dưới tác động của nhiễu loạn và lỗi của bộ truyền động.

$$\begin{bmatrix} D_v \\ D_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6\sin(5t + \pi/2) \\ 5\cos(4t + \pi) \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3v\sin(t) \\ 0.2\omega \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

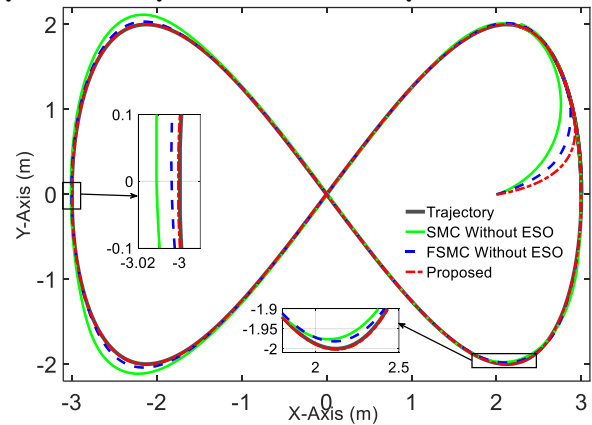


Hình 3.24. Sai lệch bám theo quỹ đạo hình số 8: (a) X-axes; (b) Y-axes; (c) theta

Hình 3.24–3.26 cho thấy quỹ đạo hình số tám dưới cả nhiễu loạn và lỗi truyền động. Nhờ các bộ quan sát ESO và IFO, bộ điều khiển được đề xuất duy trì chất lượng điều khiển được cải thiện, bằng chứng là hội tụ lỗi nhanh hơn và tín hiệu điều khiển mượt mà hơn. Sai lệch bám theo trục x và y và góc định hướng theta của bộ điều khiển được đề xuất hội tụ về không nhanh hơn với giá trị sai lệch là nhỏ hơn đáng kể trong suốt quá trình mô phỏng (Hình 3.24 (a), (b) và (c)). Các tín hiệu về vận tốc tuyến tính và vận tốc góc trong Hình 3.25 cũng thể hiện sự ổn định và điều khiển mượt mà hơn của bộ điều khiển được đề xuất. Hình 3.26 cho thấy quỹ đạo theo dõi của ba bộ điều khiển. So sánh đường màu đỏ, là quỹ đạo đạt được của bộ điều khiển được đề xuất, với quỹ đạo đã đặt cho thấy hiệu quả và ổn định của bộ điều khiển được đề xuất.



Hình 3.23. Ước tính lỗi từ bộ IFO



Hình 3.26. Quỹ đạo bám theo hình số 8

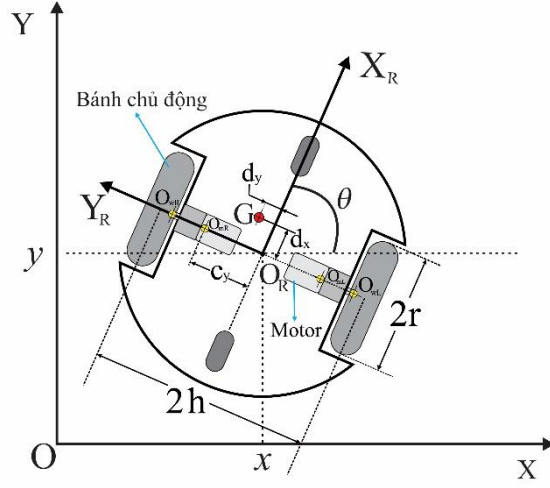
3.5. Kết luận chương 3

Chương 3 trình bày các chiến lược điều khiển chịu lỗi cho robot di động nonholonomic theo một lộ trình phát triển từ các phương pháp phi mô hình đến các kiến trúc điều khiển tích hợp dựa trên mô hình và bộ quan sát. Mục 3.1 đề xuất chiến lược điều khiển chịu lỗi phi mô hình kết hợp i-PID và bộ quan sát lỗi nhằm cải thiện khả năng bám quỹ đạo trong điều kiện bất định mô hình và lỗi actuator. Mục 3.2 phát triển điều khiển trượt chịu lỗi kết hợp hai bộ quan sát để ước lượng và bù đồng thời nhiễu và lỗi. Trên cơ sở đó, Mục 3.3 xây dựng kiến trúc điều khiển chịu lỗi hai vòng tích hợp nhiễu bộ điều khiển và bộ quan sát, cho phép tách biệt bài toán bám quỹ đạo và bù nhiễu–lỗi.

CHƯƠNG 4. ĐIỀU KHIỂN CHỊU LỖI VỚI RÀNG BUỘC HIỆU NĂNG CHO ROBOT DI ĐỘNG NON-HOLONOMIC

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

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: $\delta_v = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L)$, $\delta_\omega = \frac{r}{2W}(\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)$.



Hình 4.1. Cấu trúc của NWMR với trọng tâm bị lệch

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:

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

trong đó ω_R, ω_L là vận tốc góc mong muốn của bánh phải và bánh trái.

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

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

Đặt $C_\theta = \cos \theta, S_\theta = \sin \theta$, phương trình động học robot khi lệch trọng tâm:

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

Trong đó: $S_d = \begin{bmatrix} C\theta & S\theta & 0 \\ -dS\theta & dC\theta & 1 \end{bmatrix}^T, \mathcal{G} = [v \quad \omega]^T$

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:

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

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

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: $S_p = \begin{bmatrix} C\theta & S\theta & 0 & 1/r & 1/r \\ -dS\theta & dC\theta & 1 & h/r & -h/r \end{bmatrix}^T, \Delta\mathcal{G} = [\delta_v + \Delta v \quad \delta_\omega + \Delta\omega]^T, U_D$ là nhiễu

không khớp sinh ra do ràng buộc nonholonomic bị nhiễu.

Mô hình động lực học NWMR được viết:

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

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

Đặt $z_1 = q$, $z_2 = S_d\mathcal{G}$, $z_3 = S_dD$ hệ NWMR được biểu diễn dưới dạng:

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

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 $\Delta\omega_R, \Delta\omega_L$. Các tác động này được gộp vào 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:

- x_1 bám chính xác quỹ đạo mong muốn x_{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.

Giả thiết 4.1

- Tín hiệu bám mục tiêu z_{1d} và đạo hàm của nó $\dot{z}_{1d}$ đều bị chặn.
- Tồn tại các cận trên đối với D và $\dot{D}$ 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.

Bổ đề 4.1 [65, 66]: 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:

$$T \leq T_p = \max \left\{ t_0 + \frac{1}{\gamma_0 \mu_1 (1-\beta)} \ln \frac{\gamma_0 \mu_1 L^{1-\beta}(t_0) + \mu_2}{\mu_2}; t_0 + \frac{1}{\mu_1 (1-\beta)} \ln \frac{\mu_1 L^{1-\beta}(t_0) + \gamma_0 \mu_2}{\gamma_0 \mu_2} \right\} \quad (4.12)$$

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:

$$x \in \left\{ x : \lim_{t \rightarrow T_p} L(x) \leq \min \left\{ \frac{\chi}{(1-\gamma_0)\mu_1}, \left(\frac{\chi}{(1-\gamma_0)\mu_2} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right\} \right\} \quad (4.13)$$

4.2. Điều khiển trượt tích phân toàn cục kết hợp với bộ quan sát nhiễu cải tiến

4.2.1. Bộ quan sát nhiễu cải tiến

Bộ quan sát nhiễu cải tiến được đề xuất:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + 4\xi_1 e_{z1} \\ \dot{\hat{z}}_2 = N\tau + Q + \hat{z}_3 + 4\xi_1^2 e_{z1} \\ \dot{\hat{z}}_3 = \xi_1^3 e_{z1} + \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d) \end{cases} \quad (4.14)$$

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.

Đặt: $\psi = [\psi_1 \ \psi_2 \ \psi_3]^T = \begin{bmatrix} e_{z1} & \frac{e_{z2}}{\xi_1} & \frac{e_{z3}}{\xi_1^2} \end{bmatrix}^T$ là vector sai số ước lượng đã được chuẩn hóa, và $\delta = (\Delta_d - \hat{\beta}_{IDO} \tanh(\sigma_d)) / \xi_1^2$

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 $\beta_{IDO} > \bar{\Delta}_1$, 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). 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 một cảnh báo sẽ được kích hoạt và ngược lại:

$$F_D = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{F}_v > \text{threshold} \\ 0 & \text{if } \hat{F}_v \leq \text{threshold} \end{cases} \quad (4.22)$$

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 α_1 , tất cả các tín hiệu sai số quan sát đều bị chặn khi $t \rightarrow \infty$.

4.2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt toàn cục kết hợp hàm hiệu năng định trước

Trạng thái sai số được định nghĩa: $e = z_1 - z_{1d}$

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:

$$\rho(t) = (\rho_0 - \rho_\infty) e^{-ct} + \rho_\infty \quad (4.28)$$

trong đó: $c > 0$ quyết định tốc độ hội tụ; ρ_0 là giới hạn hiệu năng ban đầu; ρ_∞ là giới hạn hiệu năng ở trạng thái xác lập khi $t \rightarrow \infty$.

Phép biến đổi sai số bám $e(t)$ thông qua hàm $H(z_1)$ là thiết yếu để cường bức các ràng buộc hiệu năng định trước, đảm bảo rằng sai số bám luôn nằm trong các giới

hạn được xác định bởi bất đẳng thức điều khiển hiệu năng định trước (PPC). Sai số bám của vị trí đầu ra phải thỏa mãn:

$$-\zeta_d \rho(t) < e < \zeta_u \rho(t), t > 0 \quad (4.29)$$

trong đó $\zeta_d > 0$ và $\zeta_u > 0$ là các hằng số được xác định trước, lần lượt dùng để điều chỉnh cận dưới và cận trên của sai số bám.

Để tiếp tục nâng cao khả năng hội tụ của sai số bám $e(t)$, Hàm biến đổi $H(z^*)$ được đưa vào:

$$H(z^*) = \frac{\zeta_u e^{z^*} - \zeta_d e^{-z^*}}{e^{z^*} + e^{-z^*}} \quad (4.30)$$

trong đó $z^* \in \mathbb{R}$ và $H(z^*) \in (-\zeta_d, \zeta_u)$. Hàm này biến đổi sai số bám $e(t)$ thông qua:

$$e = \rho H(z^*) \quad (4.31)$$

Phép biến đổi ngược để biểu diễn z^* theo $e(t)$ và $\rho(t)$:

$$z^* = H^{-1}\left(\frac{e}{\rho}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(\zeta_d + \frac{e}{\rho}\right) - \frac{1}{2} \ln\left(\zeta_u - \frac{e}{\rho}\right) \quad (4.32)$$

H^{-1} cho phép tính trực tiếp biến z_1 từ sai số bám $e(t)$ và $\rho(t)$, qua đó tạo thuận lợi cường bức các ràng buộc sai số bám thông qua một biến đã được biến đổi.

Khi sai số bám ban đầu $e(t)$ tiến gần đến các cận $-\zeta_d \rho$ và $\zeta_u \rho$, thì biến đã biến đổi z_1 sẽ có xu hướng tiến tới vô hạn. Điều này đảm bảo rằng sai số bám $e(t)$ tuân thủ các ràng buộc hiệu năng do PPC (4.29) đặt ra.

Mặt trượt s :
$$s = \dot{z}_2 + 2\kappa_0 z^* + \kappa_0^2 \int_0^t z^* d\tau - p(t) \quad (4.33)$$

trong đó $\kappa_0 > 0$ là tham số khuếch đại, $p(t) = p(0)\exp(-\kappa_0 t)$, với $p(0) = \dot{z}_2(0) + 2\kappa_0 z^*(0) + \kappa_0^2 \int_0^t z^*(0) d\tau$.

Đạo hàm theo thời gian của s được xác định như sau:

$$\dot{s} = \dot{\dot{z}}_2 + 2\kappa_0 \dot{z}^* + \kappa_0^2 z^* - \dot{p}(t) \quad (4.34)$$

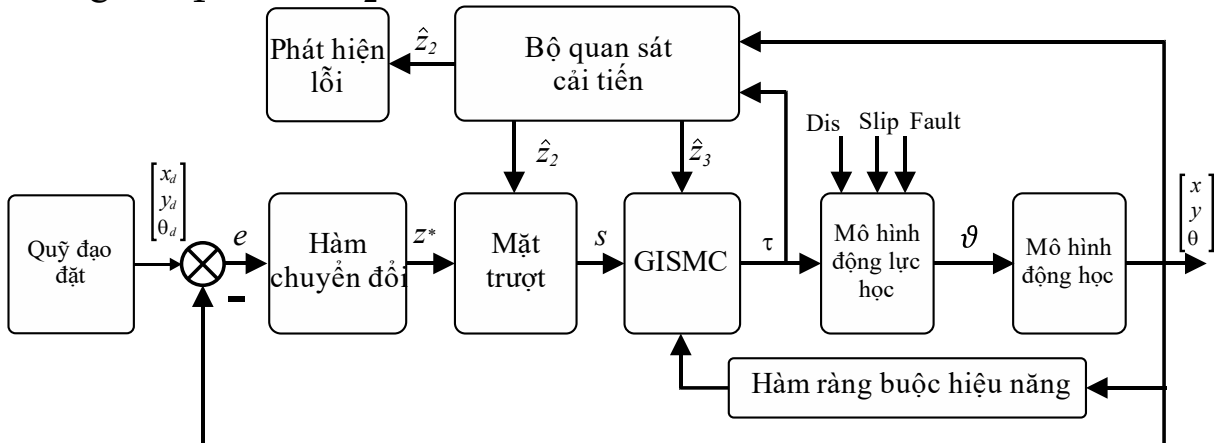
Thay các phương trình (3.14), (3.32) và (3.34) vào biểu thức trên, ta thu được:

$$\dot{s} = N\tau + Q + \dot{\hat{z}}_3 + 4\xi_1^2 e_{z1} + 2\kappa_0 \dot{z}^* + \kappa_0^2 z^* - \dot{p}(t) \quad (4.35)$$

Từ (4.35), tín hiệu điều khiển được đề xuất:

$$\tau_{GISMC} = N^{-1} \left(-Q - 2\kappa_0 \dot{z}^* - \kappa_0^2 z^* + \dot{p}(t) - \dot{\hat{z}}_3 - \kappa_2 s - \kappa_1 \tanh(s) \right) \quad (4.36)$$

trong đó $\kappa_1 > 0$ và $\kappa_2 > 0$ là các tham số thiết kế.

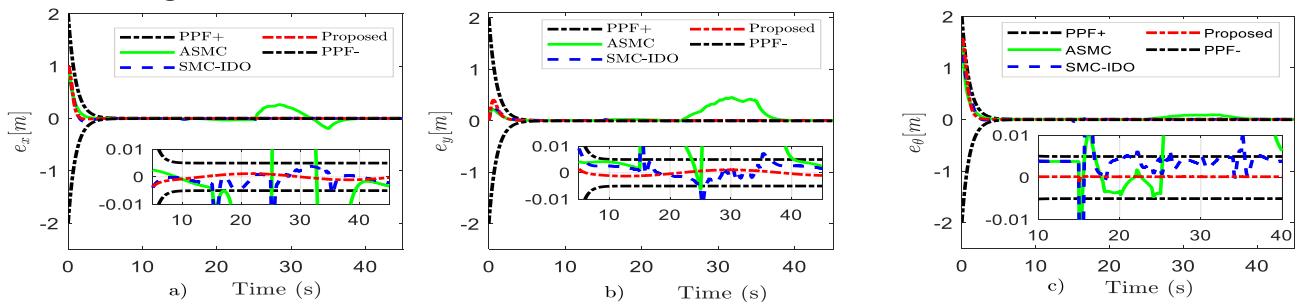


Hình 4.2. Sơ đồ khối của chiến lược điều khiển được đề xuất.

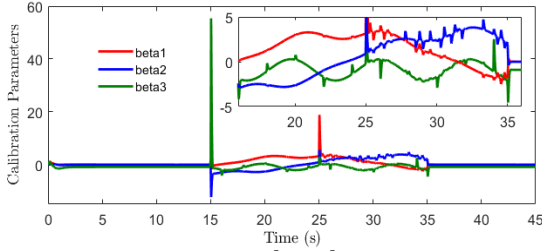
Định lý 4.2. Đối với hệ thống NWMR được mô tả bởi (4.10), dưới Giả thiết 4.1 và Bổ đề 4.1, bộ quan sát được thiết kế trong (4.14), hiệu năng định trước (4.29) và với luật điều khiển (4.36). Tất cả các trạng thái của hệ thống đều bị chặn, và sai số bám hội tụ về biên được xác định trước.

4.3.2. Kết quả và đánh giá

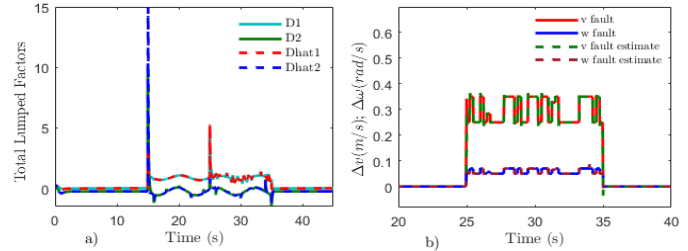
Giai đoạn I (0s – 15s): Robot hoạt động trong điều kiện danh định, độ lệch tham số mô hình 10% ($\Delta M = 0.1M, \Delta N = 0.1N$), không có nhiễu bên ngoài, trượt bánh hoặc lỗi cơ cấu chấp hành. Giai đoạn II (15s – 25s): Ngoài các thành phần nhiễu bất định ở mô hình, robot còn chịu tác động của nhiễu bên ngoài và trượt bánh, được biểu diễn bởi: $\Delta_S = [\delta_{sl} \ -r\varpi_R \ -r\varpi_L]^T$ trong đó $\delta_{sl} = 5 + 0.8\sin(t)$, $\varpi_R = \beta \sin(t)$, $\varpi_L = \beta \cos(t)$, với $0 < \beta < 0.2$. Giai đoạn III (25s – 35s): $\Delta v = \varepsilon v$, $\Delta \omega = \varepsilon \omega$ ($0.25 < \varepsilon < 0.35$). Do đó, robot đồng thời phải đối mặt với sai lệch mô hình, nhiễu bên ngoài, trượt bánh và lỗi



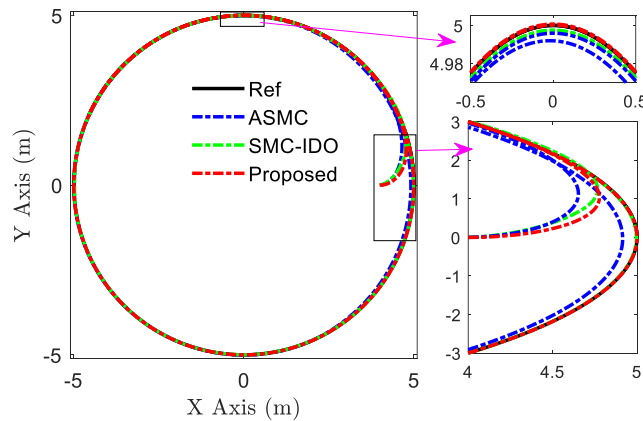
Hình. 4.3. Sai lệch bám theo các trục X, Y và góc lái θ



Hình. 4.4. Hệ số điều chỉnh của IDO



Hình. 4.5. Ước lượng lỗi và tổng ảnh hưởng của nhiễu và trượt bánh.



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)

CHỈ SỐ	MSE	MAE	RMSE	IAE	ISE
GISMIC	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

Trong Giai đoạn I, tất cả các bộ điều khiển duy trì sai số nhỏ dưới mức lệch tham số 10%. Khi xuất hiện nhiễu và trượt bánh (Giai đoạn II), bộ ASMC xuất hiện dao động lớn, trong khi SMC-IDO giảm dao động nhưng vẫn có quá độ lớn hơn so với phương pháp đề xuất. Trong Giai đoạn III, khi xảy ra lỗi cơ cấu chấp hành, bộ GISMC nhanh chóng tái ổn định và duy trì sai số nhỏ nhất. Các chỉ số định lượng trong Bảng 4.3 xác nhận kết quả này: GISMC đạt $MAE = 0.0217$, $IAE = 0.9752$ và $RMSE = 0.1133$, thấp nhất trong các phương pháp so sánh. So với ASMC, IAE và MAE giảm khoảng 81%, và giảm khoảng 11% so với SMC-IDO.

4.4. Kết luận chương 4

Chương 4 đã đề xuất một chiến lược điều khiển chịu lỗi có hiệu năng cao cho NWMR, kết hợp điều khiển trượt toàn cục, bộ quan sát nhiễu cải tiến và ràng buộc hiệu năng bám quỹ đạo định trước. Dựa trên mô hình động lực học có xét đến lỗi truyền động, trượt bánh 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 và cải thiện chất lượng quá độ của hệ thống. Phân tích ổn định Lyapunov và kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất đạt độ chính xác bám quỹ đạo cao và khả năng duy trì hiệu năng trong điều kiện nhiễu và lỗi.

KẾT LUẬN

Luận án đã nghiên cứu một cách có hệ thống bài toán điều khiển chịu lỗi cho NWMR trong điều kiện tồn tại đồng thời nhiễu, bất định mô hình và lỗi truyền động. Trên cơ sở phân tích đặc điểm động học, động lực học và các thách thức trong vận hành robot di động, luận án tập trung phát triển các phương pháp điều khiển dựa trên quan sát nhằm nâng cao độ tin cậy và chất lượng bám quỹ đạo của hệ thống. Trước hết, luận án đã xây dựng mô hình động học và động lực học của NWMR có xét đến lỗi truyền động, nhiễu và bất định mô hình, làm nền tảng cho việc thiết kế các bộ quan sát và bộ điều khiển chịu lỗi. Từ đó, luận án đề xuất một cơ chế quan sát lỗi truyền động dưới dạng sai lệch vận tốc tuyến tính và vận tốc góc, cho phép tách biệt và xử lý tường minh ảnh hưởng của lỗi truyền động ở mức động học. Trên cơ sở các kết quả quan sát, luận án đã phát triển các chiến lược điều khiển chịu lỗi dựa trên quan sát cho NWMR. Các phương pháp đề xuất đã được chứng minh ổn định thông qua phân tích Lyapunov và được kiểm chứng bằng mô phỏng trong các kịch bản vận hành có nhiễu, trượt bánh xe và lỗi truyền động.

Luận án đạt được hai đóng góp khoa học mới: (1) Luận án 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 bất định. (2) Xây dựng điều khiển chịu lỗi dựa trên điều khiển trượt, cho phép nâng cao tốc độ hội tụ và kiểm soát chặt hành vi quá độ của hệ.

Hướng phát triển: Các kết quả của luận án có thể được tiếp tục phát triển theo hướng triển khai áp dụng trên nền tảng robot AGV. Ngoài ra, các phương pháp đề xuất có thể được mở rộng để xử lý trên hệ nhiều robot, góp phần nâng cao khả năng ứng dụng của các chiến lược điều khiển chịu lỗi cho robot di động tự hành.

DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN 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/ICSSSES64899.2025.11009298. **(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)**