

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/382920077>

Fault-Tolerant Controller for Mobile Robots: Design and Experimentation Based on Fault Observation System

Conference Paper · March 2024

CITATIONS

0

READS

10

6 authors, including:



Ho Phuong
Vinh University

9 PUBLICATIONS 18 CITATIONS

SEE PROFILE



Tien Ngo Manh
Institute of Physics

24 PUBLICATIONS 95 CITATIONS

SEE PROFILE



Ngô Duy Tân
SPACE TECHNOLOGY INSTITUTE

14 PUBLICATIONS 98 CITATIONS

SEE PROFILE



Duong Dinh Tu
Vinh University

32 PUBLICATIONS 374 CITATIONS

SEE PROFILE

Bộ điều khiển chịu lỗi cho robot di động: thiết kế và thực nghiệm trên cơ sở bộ quan sát lỗi

Fault-Tolerant Controller for Mobile Robots: Design and Experimentation Based on Fault Observation System

Hồ Sỹ Phương^{1,2}, Ngô Mạnh Tiến², Ngô Duy Tân³, Dương Đình Tú¹, Đinh Văn Nam¹, Phan Văn Du¹,

¹Viện Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Vinh,

²Viện Vật lý – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,

³Viện Công nghệ vũ trụ – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Email: hosyphuong@gmail.com; nmtien@iop.vast.vn; ndtan@sti.vast.vn

Abstract

This article primarily focuses on minimizing the impact of actuator errors, a critical factor that can significantly affect the performance and efficiency of two-wheeled mobile robots. Including a fault estimation observer facilitates the rapid detection and evaluation of actuator errors during robot operation. The experimental robot model is designed with a computer connected to an embedded system, an encoder, and various sensors. The control law is designed on mathematical principles, observed information, and Lyapunov's stability theory. The experimental results confirm the accuracy and effectiveness of the proposed controller.

Keywords

Wheeled Mobile Robot, Fault-tolerant Control, Fault Estimate Observer.

Tóm tắt

Bài viết này tập trung chủ yếu vào việc giảm thiểu ảnh hưởng của các lỗi xảy ra trong bộ truyền động, một yếu tố then chốt có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất và hiệu quả hoạt động của robot di động hai bánh. Hệ thống quan sát ước tính lỗi được xây dựng để phát hiện và đánh giá nhanh chóng các lỗi có thể xuất hiện trong quá trình hoạt động của robot. Mô hình robot thực nghiệm được thiết kế bao gồm một máy tính kết nối với một hệ thống điều khiển nhúng, bộ mã hóa và nhiều cảm biến khác. Định luật điều khiển được xây dựng trên cơ sở các nguyên tắc toán học, thông tin từ hệ thống quan sát và lý thuyết ổn định Lyapunov. Kết quả từ thực nghiệm chứng minh tính chính xác và hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất.

Chữ viết tắt

WMR	Wheeled Mobile Robot
FTC	Fault-tolerant Control
AFTC	Adaptive Fault-tolerant Control

1. Giới thiệu

Đối với robot di động, bộ truyền động là một thành phần rất quan trọng đảm bảo quá trình vận hành đúng và chính xác cho mục tiêu điều khiển, tuy nhiên trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt cũng như thời gian làm việc lâu dài, bộ truyền động là một trong những thành phần dễ bị hỏng hóc, dẫn đến các sai lệch không mong muốn phía sau. Các lỗi có thể bao gồm lỗi hỏng bộ truyền động [1], lỗi bị kẹt, lỗi mất một phần hiệu quả điều khiển [2] và lỗi bộ truyền động bị lệch [3]. Việc phát hiện và giải quyết các lỗi của bộ truyền động là rất quan trọng để duy trì độ tin cậy của robot.

Trong lĩnh vực điều khiển robot, hệ thống điều khiển chịu lỗi (FTC) đóng vai trò quan trọng, cho phép robot duy trì hoạt động đáng tin cậy trong nhiều môi trường

làm việc khác nhau và ngăn chặn hiệu quả việc chấm dứt công việc do các lỗi có thể chấp nhận được [4,5]. Với đặc thù phi tuyến mạnh với tính chất đa biến và được đặc trưng bởi sự tương tác mạnh mẽ và các tham số thay đổi theo thời gian [6], nghiên cứu về điều khiển chịu lỗi trên robot di động có ý nghĩa thực tiễn và cấp thiết.

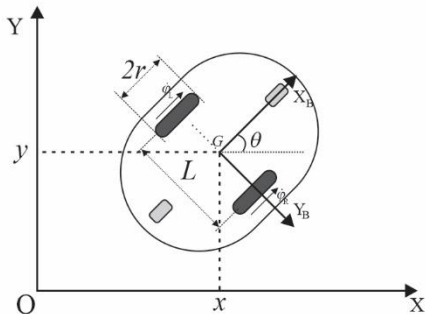
Một số phương pháp điều khiển chịu lỗi đã được giới thiệu để giải quyết vấn đề làm suy giảm hiệu suất hệ thống và mất ổn định do lỗi [10,11]. Trong số các phương pháp này, Kiểm soát khả năng chịu lỗi thích ứng (AFTC) đã được thiết lập tốt như một cách tiếp cận chắc chắn để xử lý các lỗi của bộ truyền động và sự không chắc chắn của hệ thống [12]. Một vài nghiên cứu khác cũng đã tích hợp mạng neuron và logic mờ vào sơ đồ điều khiển chịu lỗi (FTC) cho các hệ phi tuyến [13, 14] bằng cách cung cấp khả năng xác định các đặc tính phi tuyến chưa biết [15]. Kỹ thuật thích ứng cho phép ước tính theo thời gian thực các tham số không xác định và đẩy nhanh việc điều chỉnh nhanh chóng mức tăng kiểm soát để phản ứng với những thay đổi của tham số. Đây là một phương pháp khả thi để thiết kế bộ điều khiển nhằm bù đắp các lỗi của bộ truyền động [16,17].

Với mục tiêu hiện thực hóa tính khả dụng của một bộ điều khiển có khả năng chịu lỗi của robot di động 2 bánh, nhóm nghiên cứu đề xuất xây dựng một bộ quan sát lỗi nhằm ước tính giá trị lỗi tác động lên cơ cấu truyền động của robot trong quá trình hoạt động thực nghiệm, trên cơ sở đó, luật điều khiển được đề xuất sẽ chủ động thích ứng và chịu được các ảnh hưởng bất lợi của lỗi bộ truyền động một cách hiệu quả. Nghiên cứu này đóng góp hiểu biết sâu sắc và giải pháp có giá trị về khả năng kiểm soát chịu lỗi, đồng thời thúc đẩy những tiến bộ trong lĩnh vực chế tạo robot.

2. Nội dung chính

2.1 Mô hình động học của robot di động

Như thể hiện ở trên hình 1, Robot di động có hai bánh dẫn động độc lập bởi 2 động cơ DC, bán kính mỗi bánh là r , khoảng cách giữa 2 bánh xe ký hiệu là L , θ là góc định hướng của robot. $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ lần lượt là vận tốc góc của bánh xe bên trái và bánh xe bên phải. Robot được thiết kế sao cho trọng tâm G của nó nằm trên điểm giữa nối 2 trục động cơ. OXY được ký hiệu cho hệ tọa độ toàn cục của robot, $O_B X_B Y_B$ là hệ tọa độ gắn trên thân của robot.



H.1 Cấu trúc của mô hình robot

Thông qua một ma trận biến đổi Rot , mối quan hệ giữa hệ tọa độ cố định $q = x \ y \ \theta^T$ và hệ tọa độ gắn trên thân robot $q_B = x_B \ y_B \ \theta_B^T$ được biểu diễn như sau [18]:

$$\dot{q}_B = Rot(\theta)\dot{q} \tag{1}$$

Trong đó:

$$Rot(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & \frac{r}{2} \dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{r}{L} \dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L \cos \theta \\ \frac{r}{2} \dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L \sin \theta \\ \frac{r}{L} \dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L \end{bmatrix} \tag{2}$$

Với các ràng buộc nonholomic tương ứng của robot được thỏa mãn. Mô hình động học thuận của robot có thể được mô tả như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{3}$$

Trong đó:

$$\begin{cases} v = \frac{r}{2} \dot{\varphi}_R + \dot{\varphi}_L \\ \omega = \frac{r}{L} \dot{\varphi}_R - \dot{\varphi}_L \end{cases} \tag{4}$$

2.2 Thiết kế bộ điều khiển chịu lỗi cho robot

Trong phần này, một giả định trạng thái lỗi truyền động sẽ xảy ra cho cơ cấu truyền động trên robot. Một bộ quan sát lỗi và bộ điều khiển chịu lỗi được đề xuất cho hệ thống WMR trong (3). Luật điều khiển dựa trên các ước tính lỗi thu được để đảm bảo tính ổn định của hệ thống khi xảy ra lỗi.

2.2.1. Fault-tolerant controller

Mô hình sai lệch quỹ đạo bám được xác định:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B - x \\ y_B - y \\ \theta_B - \theta \end{bmatrix} \tag{5}$$

Đạo hàm 2 vế của (5) ta có:

$$\dot{e}_q = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_B \cos \theta_e \\ -\omega x_e + v_B \sin \theta_e \\ \omega_B - \omega \end{bmatrix} \tag{6}$$

Vận tốc dài và vận tốc góc đưa vào điều khiển cho robot bám quỹ đạo đặt được đưa ra:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_B \cos \theta_e + k_1 x_e \\ \omega_B + k_2 v_B y_e + k_3 \sin \theta_e \end{bmatrix} \tag{7}$$

Trong đó k_1, k_2, k_3 là các hệ số dương.

Bộ điều khiển có định luật (7) sẽ phù hợp cho bài toán điều khiển theo dõi của robot trong trường hợp không có lỗi trên cơ cấu chấp hành. Trong phạm vi bài viết, tác giả xem xét các trường hợp lỗi ảnh hưởng đến cơ cấu chấp hành như sau:

$$\begin{cases} v_f = v - \Delta v, \ 0 < \Delta v_{\min} < \Delta v < \Delta v_{\max} < v \\ \omega_f = \omega - \Delta \omega, \ 0 < \Delta \omega_{\min} < \Delta \omega < \Delta \omega_{\max} < \omega \end{cases} \tag{8}$$

Lúc đó (6) được trình bày lại như sau:

$$\dot{e}_q = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_B \cos \theta_e + \Delta \omega y_e + \Delta v \\ -\omega x_e + v_B \sin \theta_e + \Delta \omega x_e \\ \omega_B - \omega + \Delta \omega \end{bmatrix} \tag{9}$$

Vì $\Delta v, \Delta \omega$ chưa biết nên chúng ta phải thiết kế bộ quan sát lỗi để thiết kế luật điều khiển cho robot.

Bằng cách đặt:

$$\begin{cases} f(e_q) = \begin{bmatrix} y_e \omega_B \\ v_B \sin \theta_e - x_e \omega_B \\ 0 \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} v_B \cos \theta_e - v \\ \omega_B - \omega \end{bmatrix}; \\ g_1(e_q) = g_2(e_q) = \begin{bmatrix} 1 & -y_e \\ 0 & x_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; f_a = \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \end{cases} \tag{10}$$

(9) được viết lại dưới dạng:

$$\dot{e}_q = f(e_q) + g_1(e_q)u + g_2(e_q)f_a \tag{11}$$

Theo nghiên cứu [19,20], với trạng thái hệ thống e_q , đầu vào u đã biết và $\dot{f}_a = 0$ một bộ quan sát được sẽ được đưa ra để ước tính nhiễu trong (11):

$$\begin{cases} \dot{z} = -L(e_q) g_2(e_q)z + g_2(e_q)p(e_q) + f(e_q) + g_1(e_q)u \\ \hat{f}_a = z + p(e_q) \end{cases} \quad (12)$$

Ở đây, $p(e_q)$ và $L(e_q)$ được chọn sao cho thỏa mãn:

$$L(e_q) = \frac{\partial p(e_q)}{\partial e_q} \quad (13)$$

Bởi vậy, luật điều khiển được đề xuất như sau sẽ thay thế cho (7).

$$\begin{aligned} \dot{V} = & x_e - v_B \cos \theta_e + k_1 x_e + 2y_e \hat{\Delta\omega} + \hat{\Delta v} + v_B \cos \theta_e + 2\Delta\omega y_e + \Delta v + \dots \\ & + \frac{\sin \theta_e \omega_B - \omega_B + k_2 v_B y_e + k_3 \sin \theta_e + \hat{\Delta\omega} + k_2 y_e v_B + \Delta\omega}{k_2} \\ = & -k_1 x_e^2 - \frac{1}{k_2} \sin^2 \theta_e < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov [21]. Hệ thống (3) với luật điều khiển (14) đề xuất ổn định tiệm cận.

2.3 Mô phỏng trên Matlab-Simulink

Dựa trên MATLAB - Simulink, các mô phỏng được tiến hành để xác minh tính hiệu quả của bộ điều khiển chịu lỗi được đề xuất. Các thông số của robot có bánh xe được sử dụng trong các mô phỏng được đưa ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số của robot.

Mass (kg)	r (m)	L (m)	I (kg m ²)
15	0.1	0.4	2.5

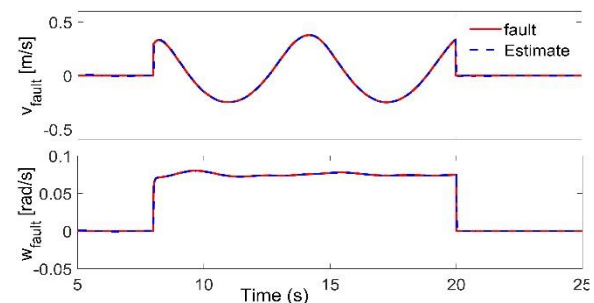
Lỗi ảnh hưởng đến bộ truyền động được giả thiết tại thời điểm $t > 8$ với:

$$f_a = \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2v \sin(t) \\ 0.2\omega \end{bmatrix} \quad (18)$$

Tham số của robot cũng thay đổi ngẫu nhiên. ảnh hưởng đồng thời với thời gian tác động của lỗi: $m=15+5*\sin(rad)$, $I=2.5+0.5*\cos(rad)$.

Tham số của bộ quan sát được chọn:

$$p(q_e(t)) = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e \end{bmatrix}; L(q_e(t)) = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix};$$



H. 2 Lỗi ước tính từ bộ quan sát

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + k_x x_e + 2y_e \hat{\Delta\omega} + \hat{\Delta v} \\ \omega_r + k_y v_r y_e + k_\theta \sin \theta_e + \hat{\Delta\omega} \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2.2. Phân tích tính ổn định của hệ thống với lý thuyết Lyapunov.

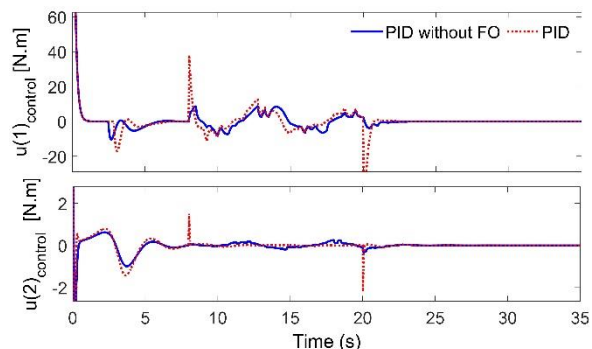
Với bộ điều khiển (14) đề xuất cho mô hình robot, hàm Lyapunov xác định dương được chọn:

$$V = \frac{x_e^2 + y_e^2}{2} + \frac{1 - \cos \theta_e}{k_y} \quad (15)$$

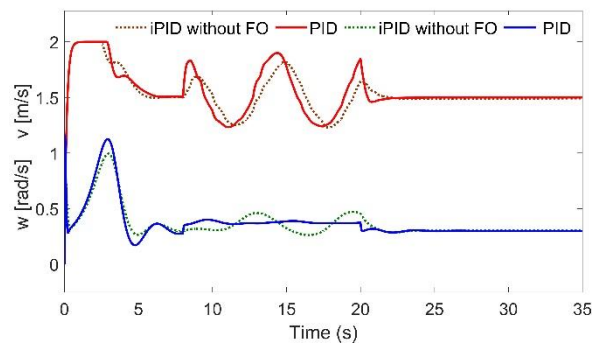
Đạo hàm 2 vế của (15) và thay $\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e$ từ (9) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & x_e - v + v_B \cos \theta_e + 2\Delta\omega y_e + \Delta v + \\ & \frac{\sin \theta_e \omega_r - \omega + k_2 y_e v_B \Delta\omega}{k_2} \end{aligned} \quad (16)$$

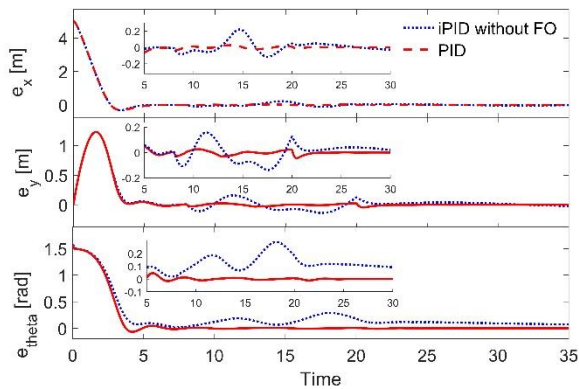
Kết hợp với luật điều khiển (14), (16) trở thành:



H. 3 Tín hiệu điều khiển đến khối động lực học



H. 4 Tín hiệu điều khiển đến khối động học

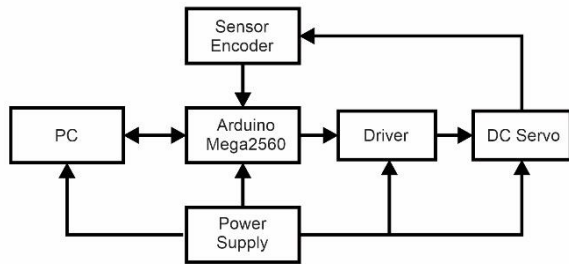


H. 5 Sai lệch bám theo trục x, y và theta

Các lỗi ảnh hưởng đến hệ thống robot sau 8 giây trong mô phỏng. Hình 1 cho thấy phản ứng kịp thời và chính xác của hệ thống quan sát. Dựa trên ước tính lỗi được phát hiện, bộ điều khiển đưa ra tín hiệu thích hợp để bù cho các lỗi và đảm bảo nhiệm vụ theo dõi quỹ đạo đã đặt (Hình 3,4). Hình 5, 6 cho thấy hoạt động hiệu quả và ổn định của bộ điều khiển được đề xuất.

2.4 Kết quả thực nghiệm

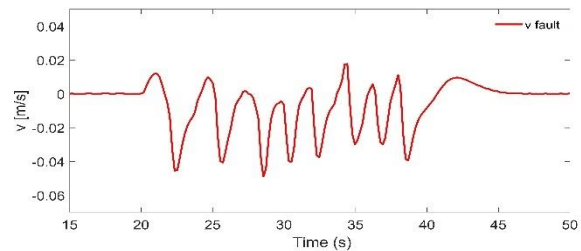
Mô hình thực nghiệm của robot được thiết kế có sơ đồ cấu trúc được thể hiện trên hình 6



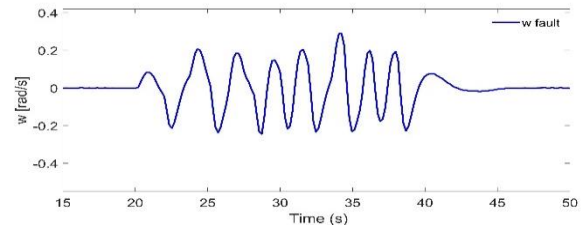
H. 6 Cấu trúc phần cứng của robot thực nghiệm

Quá trình thử nghiệm các bộ điều khiển của robot được xây dựng và triển khai thông qua việc kết hợp Matlab-Simulink với vi điều khiển Arduino Mega 2560 trên mô hình robot có trọng lượng 15kg, bán kính bánh 0.1m. Luật điều khiển chịu lỗi với thế mạnh phản hồi từ bộ quan sát sẽ được so sánh với luật điều khiển không có bộ quan sát. Tác động vật lý nhằm giảm hiệu suất của động cơ được tiến hành trên bánh phải, nhằm giả lập ảnh hưởng của lỗi bộ truyền động. Tác động được tiến hành trong cả hai trường hợp bắt đầu từ giây thứ 20 đến 40 trong quá trình hoạt động của robot. Việc chạy thực nghiệm đang được triển khai trên mô hình robot bánh lốp trong địa hình không trượt, do đó ảnh hưởng của trượt ngang và trượt dọc có thể xem xét bỏ qua ở đây.

Trường hợp 1. Robot bám quỹ đạo với bộ điều khiển PID thông thường.

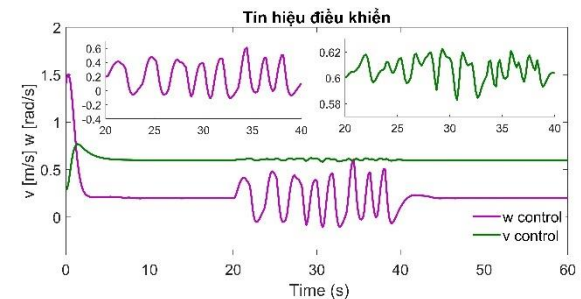


a)

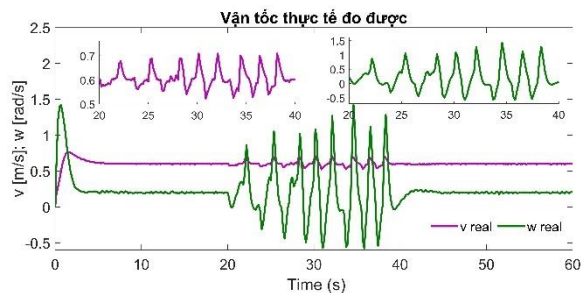


b)

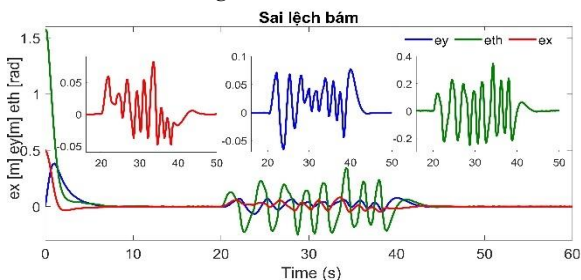
H. 7 Tác động vật lý gây ảnh hưởng tới vận tốc: a) vận tốc dài; b) vận tốc góc



H. 8 Tín hiệu điều khiển

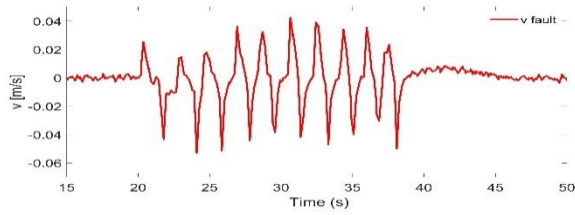


H. 9 Vận tốc thực nghiệm đo được trên robot

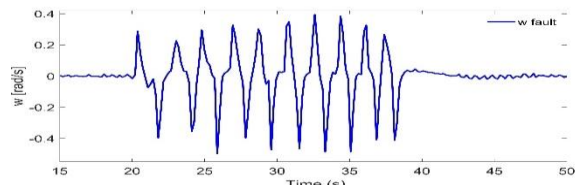


H. 10 Sai lệch bám theo trục x, y và góc lái theta

Trường hợp 2. Robot bám quỹ đạo với bộ điều khiển đề xuất:

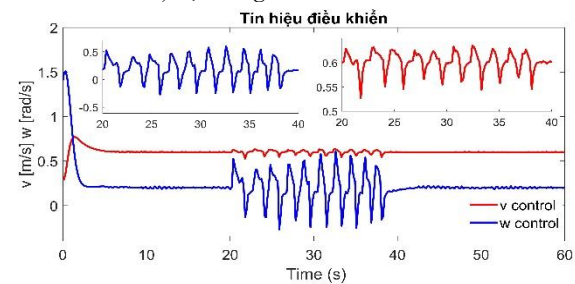


a)

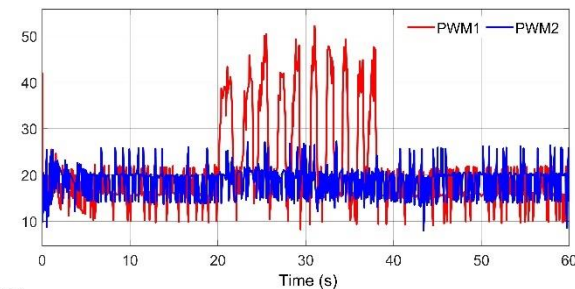


b)

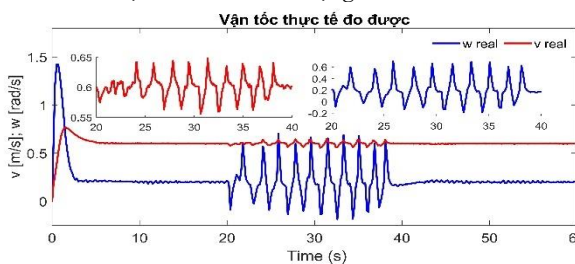
H. 11 Tác động vật lý gây ảnh hưởng tới vận tốc: a) vận tốc dài; b) vận tốc góc



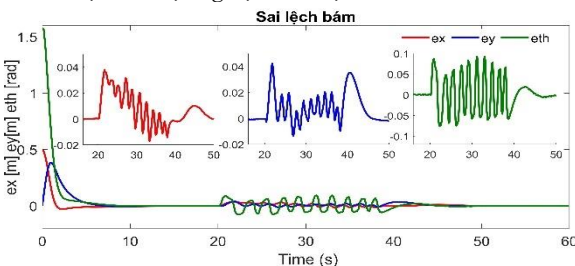
H. 12 Tín hiệu điều khiển



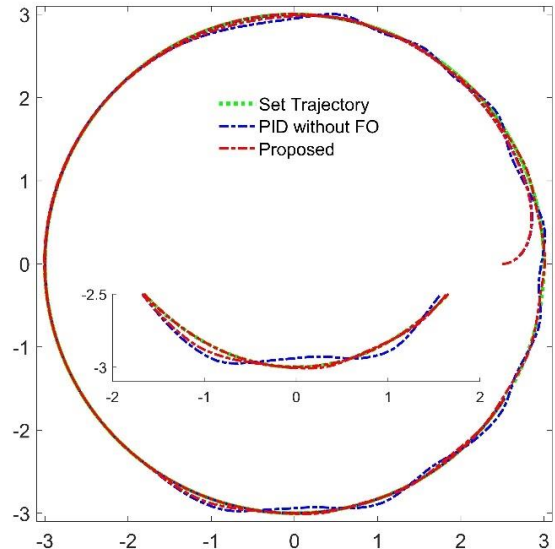
H. 13 Tín hiệu điều khiển trên động cơ



H. 14 Vận tốc thực nghiệm đo được trên robot



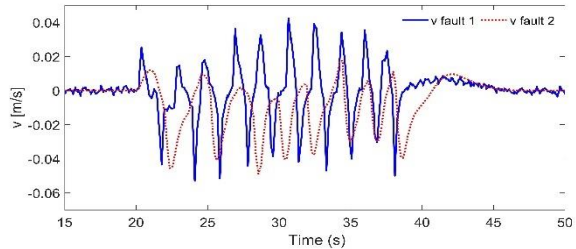
H. 15 Sai lệch bám theo trục x, y và góc lái theta



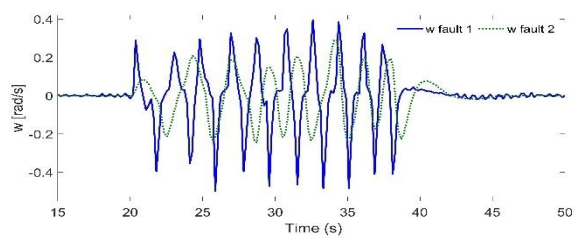
H. 16 Quỹ đạo bám

Nhận xét:

Các bộ điều khiển được kiểm chứng trên cùng một mô hình khác nhau do vậy tác động vật lý ảnh hưởng tới mô hình sẽ không được đồng đều. Tuy nhiên kết quả thu thập được từ bộ quan sát qua H. 8 và H. 13 cho thấy tác động ảnh hưởng tới vận tốc và vận tốc góc của trường hợp 2 là lớn hơn (H. 18).



a)



b)

H. 17 Ảnh hưởng tới vận tốc của robot thu được từ bộ quan sát: a) vận tốc dài; b) vận tốc góc

H. 10 và H. 15 cũng cho thấy sự ảnh hưởng của sự tác động đó tới vận tốc của robot trong thực tế. Tuy nhiên Bộ điều khiển phát huy vai trò của mình bằng cách hiệu chỉnh tín hiệu điều khiển cho robot, kết quả trên H. 9 và H. 14 cho thấy điều đó. Tuy nhiên kết quả ở H. 16 và H. 11 lại cho thấy sự khác biệt trong hiệu quả điều khiển mà 2 bộ điều khiển mang lại. Bộ điều khiển chịu lỗi với sự hỗ trợ tín hiệu từ bộ quan sát đã phát huy được tính hiệu quả và nổi trội hơn trong việc giảm tác động của lỗi tới kết quả bám quỹ đạo của robot. H. 17 là kết quả trực quan về lại quá trình điều khiển bám quỹ đạo của robot khi áp dụng 2 bộ điều khiển.

3. Kết luận

Trong bài báo này khả năng ước tính lỗi của bộ truyền động của bộ quan sát đáp ứng thời gian thực, nhờ vậy bộ điều khiển đã xử lý bù lỗi một cách kịp thời, giảm thiểu tác động tiêu cực do lỗi gây ra, do đó đảm bảo cho nhiệm vụ bám quỹ đạo của robot di động một cách ổn định. Kết quả thực nghiệm là một minh chứng cho tính hiệu quả và khả dụng của bộ điều khiển được đề xuất. Thực nghiệm được tiến hành trong địa hình thuận lợi và không có trượt do đó vị trí thực tế đạt được thông qua việc đọc encoder có thể đảm bảo, tuy nhiên để đảm bảo hiệu suất của bộ điều khiển cũng như đảm bảo tính chính xác trong việc xác định vị trí của robot trong các địa hình khác, một hệ tọa độ toàn cục cần phải được xây dựng thông qua một hệ thống camera quan sát quá trình chuyển động của robot. Trong giai đoạn tiếp theo, nhóm sẽ tiếp tục nghiên cứu, cập nhật và kết hợp thêm các bộ điều khiển khác nhằm tối ưu và nâng cao khả năng chịu lỗi ở mức độ lớn hơn.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Li, X.-J., Yang, G.-H.: ‘Robust adaptive fault-tolerant control for uncertain linear systems with actuator failures’, *IET Control Theory Applic.*, 2012, 6, (10), pp. 1544–1551
- [2]. Jin, X., Qin, J., Shi, Y., et al.: ‘Auxiliary fault tolerant control with actuator amplitude saturation and limited rate’, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, 2018, 48, (10), pp. 1816–1825
- [3]. Qin, J., Zhang, G., Zheng, W.X., et al.: ‘Adaptive sliding mode consensus tracking for second-order nonlinear multiagent systems with actuator faults’, *IEEE Trans. Cybern.*, 2019, 49, (5), pp. 1605–1615, DOI: 10.1109/TCYB.2018.2805167
- [4]. Yingwei Zhang, Shuying Wu, and Yuan Wei, Fault-Tolerant Control of Nonlinear System, *International Journal of Control, Automation, and Systems* (2011) 9(6):1116-1123.
- [5]. X. Qi, J.-T. Qi, D. Theilliol, Y.-M. Zhang, J.-D. Han, D.-L. Song and C.-S. Hua, “A review on fault diagnosis and fault tolerant control methods for single-rotor aerial vehicles,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 73, no. 1-4, pp. 535-555, January 2014.
- [6]. E. Naderi and K. Khorasani, “A data-driven approach to actuator and sensor fault detection, isolation and estimation in discrete-time linear systems,” *Automatica* 85 (2017), 165–178.
- [7]. Tae H. Lee; Chee Peng Lim; Saeid Nahavandi, “Rodney G. Roberts, Observer-Based H_∞ Fault-Tolerant Control for Linear Systems With Sensor and Actuator Faults”, *IEEE Systems Journal*, Volume: 13, Issue: 2, June 2019, pp. 1981 – 1990.
- [8]. Li-Ying Hao, Lian-Sheng Zhou, “Fault-Tolerant Control of Linear Systems with Unmatched Uncertainties Based on Integral Sliding Mode Technique”, *Actuators* 2022, 11(8), 241; <https://doi.org/10.3390/act11080241>

4. Cảm ơn

Bài báo được tài trợ bởi Đề tài cấp Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam “Nghiên cứu, hoàn thiện thiết kế và chế tạo mẫu robot dạng người thông minh IVASTBot ứng dụng trong giao tiếp lễ tân văn phòng”, mã số CT0000.01/24-25.

- [9]. Koubaa, A., Bennaceur, H., Chaari, I., et al.: “Robot path planning and cooperation: foundations, algorithms and experimentations”, (Springer, Berlin, 2018).
- [10]. Q. Y. Fan and G. H. Yang, “Active complementary control for affine nonlinear control systems with actuator faults”, *IEEE Trans. Cybern. PP* (2017), no. 99, 1–12.
- [11]. M. Atitallah, M. Davoodi, and N. Meskin, “Event-triggered fault detection for networked control systems subject to packet dropout”, *Asian J. Control* 20 (2018), no. 6, 2195–2206.
- [12]. Xiao-Zheng Jin, Ye-Xing Zhao, Hai Wang, Zhen Zhao, Xue-Ping Dong. “Adaptive fault-tolerant control of mobile robots with actuator faults and unknown parameters”, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 13 Iss. 11, 2019, pp. 1665-1672
- [13]. Paul M. Frank, Birgit Köppen-Seliger, “Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis”, *International Journal of Approximate Reasoning*, Volume 16, Issue 1, January 1997, Pages 67-88
- [14]. Yang Cui, Guangren Duan, Xiaoping Liu & Hongyu Zheng, “Adaptive Fuzzy Fault-Tolerant Control of High-Order Nonlinear Systems: A Fully Actuated System Approach”, *International Journal of Fuzzy Systems* volume 25, pages1895–1906 (2023).
- [15]. J. A. Farrell and M. M. Polycarpou, *Adaptive Approximation Based Control: Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, USA, 2006.
- [16]. Xiao-Ni Zhang, Jian-Liang Wang, “Adaptive fault-tolerant tracking controller design against actuator stuck faults”, *Control and Decision Conference (CCDC)*, 2012 24th Chinese, 10.1109/CCDC.2012.6244655.

- [17]. H. S. Phuong, N. M. Tien, N. D. Tan, M. T. Anh and D. D. 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, 2023, pp. 507-512
- [18]. Imil Hamda Imran, Allahyar Montazeri, "An Adaptive Scheme to Estimate Unknown Parameters of an Unmanned Aerial Vehicle", 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR), 10.1109/NIR50484.2020.9290205
- [19]. Chen, W.-H., Ballance, D. J., Gawthrop, P. J., and O'Reilly, J. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators. IEEE Trans. Ind. Electron., 2000, 47(4), 932–938
- [20]. Arvo Kaldmae and Ulle Kotta. (2020). A brief tutorial overview of disturbance observers for nonlinear systems: application to flatness-based control. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 69, 1, 57–73. <http://dx.doi.org/10.3176/proc.2020.1.07>
- [21]. H. Khalil, Nonlinear Systems, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.



Sy Phuong Ho Graduated Engineering Degree major in Electronic and Telecommunications at Vinh University from 2004-2009. Received a master's degree in Automation from the Military Technical Academy in 2012. Now, He is studying PhD at Graduate

University of Sciences and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, and works at the Institute of Engineering and Technology, Vinh University. The main researches: Robotics, adaptive control, fuzzy logic and neural network control, image processing.



Manh Tien Ngo Graduated Engineering Degree major in Automatic Control at Hanoi University of Science and Technology (HUST) from 1996-2001. Defensed Dr. Degree in Electrical Engineering at HUST in 2014. Now, works at Institute of

Physics, Vietnam Academy of Science and Technology. The main researches: Process control, adaptive control, fuzzy logic and neural network control, automatic robot control, electro-optical system, image processing.



Duy Tan Ngo Graduated Engineering Degree major in Electronics and Telecommunication at Hanoi University of Science and Technology (HUST) from 1996-2001. Defensed Dr. Degree in Vietnam Academy of Science and Technology in 2019. Now, works

at Space Technology Institute, Vietnam Academy of Science and Technology. His main research topics: Process control, adaptive control, fuzzy logic and neural network control, automatic robot control, image processing, AI and IoT.



Tu Duong Dinh Graduated Engineering Degree major in Electronic and Telecommunications at Vinh University from 2004-2009, Defensed Dr. Degree in automation and control of technological processes and production from Moscow University of Transport in

2019. Currently, works at the Institute of Engineering and Technology, Vinh University. Main research directions: automation and control of technological processes and production, robotics, image processing.



Nam Dinh Van received the B.E. degree in Control and Automation Engineering from Hanoi University of Science and Technology (HUST), Hanoi, VietNam in 2012, and the M.S. Degree in Control and Automation Engineering from Le Quy Don Technical University,

VietNam in 2016, and the Ph.D. degree from Chungbuk National University, South Korea in 6/2022, respectively. Currently, works at the Institute of Engineering and Technology, Vinh University. The main researches: include Robotics-AI, SLAM, state estimation, optimization, learning control, machine learning, and control systems.



Van Du Phan received the B.S. and M.Sc. degree in electrical engineering from the Hanoi University of Science and Technology, Ha Noi, Vietnam (2013) and Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen, Viet Nam (2017), and the Ph.D. degree from University of Ulsan, South Korea in 2023, respectively.

His research interests include soft robot, hydraulic systems, intelligent control, fault tolerant control and renewable energy (fuel cell systems).