

INDIRECT ADAPTIVE CONTROL BASED ON FUZZY INFERENCE SYSTEMS FOR WHEEL VEHICLES WITH MODEL UNCERTAINTY AND UNKNOWN DISTURBANCE

Do Thi Mai¹, Pham Luong Hoang¹, Nguyen Thi Hong Hanh², Nguyen Hoai Nam^{1*}

¹School of Electrical and Electronic Engineering - Ha Noi University of Science and Technology

²Institute of Mechanics - Viet Nam Academy of Science and Technology

ARTICLE INFO

Received: 07/3/2025
Revised: 04/6/2025
Published: 04/6/2025

KEYWORDS

Autonomous vehicle
 Adaptive control
 Model uncertainty
 Unknown matched disturbance
 Fuzzy inference system

ABSTRACT

In this paper, an indirect adaptive controller based on fuzzy inference systems for a three-wheeled mobile robot was designed. The mathematical model of the non-holonomic mobile robots was considered with uncertain parameters and matched external disturbances, which was combined into an unknown lumped dynamic functions. These unknown functions were approximated by using fuzzy inference systems with adaptive tuning laws. Based on the approximate results obtained from the fuzzy inference system, the control signal for the inner loop control was calculated to ensure the convergence of the speed error to the origin region. Numerical simulations were performed on MATLAB when the robot was affected by time-varying unknown parameters and matched disturbances. The numerical simulation results show that the trajectory tracking error approaches the origin domain in short time and proves the high capacity of the fuzzy inference system to approximate the nonlinear functions and the effectiveness of the proposed control method.

ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI GIÁN TIẾP DỰA TRÊN HỆ SUY LUẬN MỜ CHO XE CÓ MÔ HÌNH BẤT ĐỊNH VÀ NHIỀU TÁC ĐỘNG CHƯA BIẾT

Đỗ Thị Mai¹, Phạm Lương Hoàng¹, Nguyễn Thị Hồng Hạnh², Nguyễn Hoài Nam^{1*}

¹Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Viện Cơ học - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 07/3/2025
Ngày hoàn thiện: 04/6/2025
Ngày đăng: 04/6/2025

TỪ KHÓA

Xe tự hành
 Điều khiển thích nghi
 Bất định mô hình
 Nhiều đầu vào chưa biết
 Hệ suy luận mờ

TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc thiết kế bộ điều khiển bám thích nghi gián tiếp dựa trên hệ suy luận mờ cho xe tự hành ba bánh. Mô hình toán của xe tự hành có tham số bất định và nhiễu ngoài tác động ở đầu vào. Bất định mô hình và nhiễu ngoài được gộp lại thành các hàm bất định tổng. Các hàm bất định này được xấp xỉ dựa trên hệ suy luận mờ với luật chỉnh định thích nghi. Trên cơ sở đó, tín hiệu điều khiển cho vòng động lực học được tính toán đảm bảo sai lệch tốc độ hội tụ về vùng chứa gốc không. Mô phỏng số được thực hiện trên MATLAB khi cho robot chịu tác động của bất định tham số mô hình và nhiễu chưa biết biến thiên theo thời gian. Kết quả cho thấy sai số bám quỹ đạo về một miền chứa gốc không trong thời gian ngắn và chứng tỏ khả năng cao của hệ suy luận mờ để xấp xỉ các hàm phi tuyến và hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12238>

* Corresponding author. Email: nam.nguyenhoai@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Robot di động có bánh xe đã được nghiên cứu và sử dụng rộng rãi công nghiệp và dịch vụ khác nhau, chẳng hạn như vận tải, kiểm tra, an ninh, thám hiểm hành tinh [1]. Các ứng dụng này yêu cầu robot di động phải có khả năng bám theo một quỹ đạo chuyển động cụ thể một cách ổn định. Do đó, bài toán điều khiển bám quỹ đạo được các kỹ sư và nhà nghiên cứu rất quan tâm, đặc biệt khi có xét đến bất định mô hình và có nhiễu ngoài tác động tại đầu vào cũng chưa biết.

Để giải quyết vấn đề trên đã có nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu và áp dụng cho xe tự hành. Phương pháp điều khiển trượt là một trong những phương pháp điều khiển bền vững thường được sử dụng để xử lý vấn đề bất định của mô hình cũng như nhiễu tác động chưa biết. Nhiều biến thể khác nhau của điều khiển trượt đã được nghiên cứu và áp dụng. Điều khiển trượt thích nghi ước lượng và bù nhiễu dựa trên hàm Lyapunov [2] đã được thiết kế để điều khiển bám quỹ đạo cho xe khi có bất định mô hình ở vòng động học và động lực học. Trượt thích nghi tham số khuếch đại điều khiển được trình bày trong [3] áp dụng cho xe tự hành có tích hợp động lực học cơ cấu chấp hành với mong muốn hạn chế hiện tượng dao động. Công trình [4] thiết kế bộ điều khiển trượt hội tụ hữu hạn kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng. Một bộ điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát trạng thái phi tuyến đã được phát triển trong [5].

Công trình [6] đề xuất thiết kế bộ điều khiển kết hợp bộ quan sát nhiễu dựa trên xấp xỉ Euler bậc nhất [7] giải quyết nhiễu gộp đầu vào cho đối tượng phi tuyến thiếu cơ cấu chấp hành. Nghiên cứu [8] đã áp dụng bộ quan sát nhiễu để ước lượng nhiễu ở cả hai vòng động học và động lực học, sau đó kết hợp với bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi cho vòng động học và bộ điều khiển thích nghi cho vòng động lực học. Trong bài báo [9], hai bộ quan sát nhiễu phi tuyến cũng được thiết kế cho cả vòng trong và vòng ngoài kết hợp với bộ điều khiển phản hồi sai số cho đối tượng có xét đến trượt bánh xe. Khi xe chịu tác động của cả nhiễu ngẫu nhiên và nhiễu không ngẫu nhiên, bộ quan sát nhiễu phi tuyến kết hợp với bộ lọc Kalman [10] đã được thiết kế trong trường hợp này.

Một công cụ khác để giải quyết vấn đề bất định đó là sử dụng mạng nơ-ron để xấp xỉ hàm bất định của mô hình. Trong bài báo [11], mạng nơ-ron đã được sử dụng để xấp xỉ thành phần bất định và kết hợp với điều khiển trượt có mặt trượt hội tụ về gốc không trong thời gian hữu hạn. Một bộ điều khiển thích nghi dựa trên mạng nơ-ron để xử lý vấn đề động lực học bất định được đề xuất trong công trình [12]. Nghiên cứu [13] đã sử dụng điều khiển trượt kết hợp với mạng nơ-ron để xử lý ảnh hưởng của thành phần bất định.

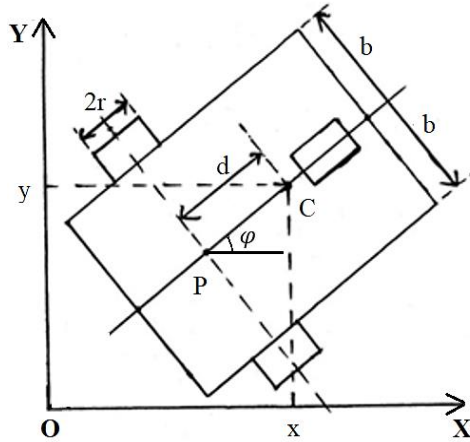
Hơn nữa, hệ suy luận mờ cũng có khả năng xấp xỉ hàm bất định [14]. Hệ suy luận mờ được ứng dụng để xấp xỉ thành phần bất định và kết hợp với bộ điều khiển tuyến tính hóa phản hồi tương tự như điều khiển cuốn chiếu [15]. Trong nghiên cứu [16], hệ suy luận mờ được sử dụng kết hợp với bộ điều khiển trượt có mặt trượt hội tụ hữu hạn.

Từ những phân tích ở trên ta thấy, bộ điều khiển trượt có khả năng kháng nhiễu tốt nhưng còn tồn tại vấn đề cơ bản nằm ở sự dao động tín hiệu đầu vào điều khiển tần số cao; chiến lược điều khiển thích nghi dựa trên mạng nơ-ron có thiết kế phức tạp. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một bộ điều khiển thích nghi dựa trên hệ suy luận mờ có thiết kế đơn giản hơn và tránh được tần số dao động cao đầu vào.

Phần còn lại của bài báo gồm những nội dung sau: phần 2 trình bày phương pháp nghiên cứu và thiết kế chiến lược điều khiển thích nghi gián tiếp dựa trên hệ suy luận mờ; phần 3 bàn luận về kết quả mô phỏng kiểm chứng bộ điều khiển đề xuất; phần cuối cùng đưa ra các kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Thiết kế hệ thống điều khiển dựa trên cơ chế thích nghi gián tiếp

Xét đối tượng robot di động bao gồm hai bánh sau được điều khiển độc lập bởi hai động cơ có đặc tính tương tự nhau và một bánh trước đa năng có thể di chuyển tự do theo mọi hướng như trong Hình 1. Trong đó, r là bán kính bánh xe, d là khoảng cách từ trọng tâm của xe tới điểm giữa hai bánh lái, $2b$ là chiều rộng của xe.



Hình 1. Mô hình của xe tự hành 3 bánh phi khả tích

Mô hình động học và động lực học của robot khi không xét đến động lực học của cơ cấu chấp hành được mô tả như trong biểu thức (1) và (2) tương ứng [3], [4]:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -d \cdot \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & d \cdot \cos(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M\dot{\boldsymbol{\eta}} + A(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta} = B(\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d) \quad (2)$$

Trong đó:

+ $\mathbf{q} = [x \ y \ \varphi]^T \in \mathbb{R}^3$ biểu thị vị trí và hướng của robot

+ $\boldsymbol{\eta} = [v \ \omega]^T \in \mathbb{R}^2$ là véc tơ vận tốc tuyến tính và vận tốc góc

+ d là khoảng cách giữa điểm trọng tâm xe và trung điểm trục nối giữa 2 bánh lái

+ $\boldsymbol{\tau} = [\tau_r \ \tau_l]^T$ thể hiện momen xoắn tác dụng vào bánh xe

+ $\boldsymbol{\tau}_d = [\tau_{rd} \ \tau_{ld}]^T$ là nhiễu đầu vào chưa biết

+ $M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ với m là khối lượng tổng của xe, I là momen quán tính của xe

+ $A = \begin{bmatrix} 0 & -md\dot{\varphi} \\ md\dot{\varphi} & 0 \end{bmatrix}$; $B = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ b & -b \end{bmatrix}$

Phương trình (2) được biến đổi thành [3]:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \bar{A}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta} + \bar{B}(\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d) \quad (3)$$

Với $\bar{A} = -M^{-1}A$; $\bar{B} = M^{-1}B$.

Quy trình thiết kế hệ thống điều khiển được tiến hành theo hai bước:

Bước 1: dựa theo phương trình động học, yêu cầu thiết kế bộ điều khiển tốc độ $\boldsymbol{\eta}_c$ để $\mathbf{q} = [x \ y \ \varphi]^T$ dần tiến tới $\mathbf{q}_d = [x_d \ y_d \ \varphi_d]^T$.

Bước 2: dựa theo phương trình động lực học, yêu cầu thiết kế bộ điều khiển mờ thích nghi gián tiếp để vận tốc thực tế $\boldsymbol{\eta} = [v \ \omega]^T$ dần tiến tới giá trị mong muốn $\boldsymbol{\eta}_c = [v_c \ \omega_c]^T$ được tính toán từ vòng ngoài.

2.1. Điều khiển hệ động học

Mục tiêu của bộ điều khiển này là xác định luật điều khiển sao cho robot sẽ bám theo quỹ đạo ($\mathbf{e}_\rho \rightarrow 0$). Sai số bám quỹ đạo được tính như sau:

$$\mathbf{e}_\rho = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \varphi_d - \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tín hiệu điều khiển ảo cho vòng động học được thiết kế như sau [10]:

$$\begin{cases} v_c = v_d \cos(e_\varphi) + k_x(e_x + d - d\cos(e_\varphi)) \\ \omega_c = \omega_d + k_y v_d(e_y - d\sin(e_\varphi)) + v_d k_\varphi \sin(e_\varphi) \end{cases} \quad (5)$$

Với k_x, k_y, k_φ là các hệ số dương. Tính hội tụ của luật điều khiển vòng ngoài được chứng minh thông qua lý thuyết điều khiển Lyapunov [10].

Xét hàm ứng viên Lyapunov xác định dương như sau:

$$V_0 = \frac{(e_x + d(1 - \cos(e_\varphi)))^2 + (e_y - d\sin(e_\varphi))^2}{2} + \frac{1 - \cos(e_\varphi)}{k_\varphi} \quad (6)$$

Đạo hàm của hàm V_0 :

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 = & (e_x + d - d\cos(e_\varphi))(\dot{e}_x + d\dot{e}_\varphi \sin(e_\varphi)) + (e_y - \\ & d\sin(e_\varphi))(\dot{e}_y - \dot{e}_y d\cos(e_\varphi)) + \frac{\dot{e}_\varphi \sin(e_\varphi)}{k_\varphi} \end{aligned} \quad (7)$$

Thông qua một số thao tác biến đổi dựa trên biểu thức của sai số và đạo hàm của sai số bám quỹ đạo, phương trình chuyển động của quỹ đạo tham chiếu và mối quan hệ ràng buộc phi khả tích; kết hợp với bộ điều khiển vận tốc vòng ngoài được lựa chọn như trong (5), ta có:

$$\dot{V}_0 = -k_x(e_x + d(1 - \cos(e_\varphi)))^2 - \frac{k_y \sin^2(e_\varphi)}{k_\varphi} \quad (8)$$

Rõ ràng ta thấy $V_0 \geq 0$ và $\dot{V}_0 \leq 0$. Như vậy, bộ điều khiển (5) là ổn định tiệm cận.

2.2. Điều khiển hệ động lực học

Xét phương trình động lực học:

$$\dot{\eta} = \bar{A}(\eta)\eta + \bar{B}(\tau + \tau_d) \quad (9)$$

Đặt:

$$u = \bar{B}\tau = \begin{bmatrix} u_r \\ u_l \end{bmatrix}$$

Mối quan hệ giữa mô men lực tác (τ) động lên hai bánh xe và tín hiệu điều khiển (u) được viết lại tường minh như sau:

$$\begin{aligned} \tau_r &= \frac{1}{2} \left(r m u_r + \frac{r l}{b} u_l \right) \\ \tau_l &= \frac{1}{2} \left(r m u_r - \frac{r l}{b} u_l \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Sau khi biến đổi phương trình (3) thu được:

$$\dot{\eta} = F(\eta) + u \quad (11)$$

Với $F(\eta) = \bar{A}(\eta)\eta + (\bar{B} + \Delta\bar{B})\tau_d + \Delta\bar{B}\tau$, được gộp chung thành một hàm động lực học chưa biết có chứa thành phần bất định mô hình $\bar{A}(\eta)$, $\Delta\bar{B}$ và nhiễu ngoài τ_d . Do tính chất biến thiên không ngừng của nó, bộ điều khiển mờ thích nghi gián tiếp được sử dụng để ước lượng thành phần bất định và tính toán tín hiệu điều khiển sao cho $\eta \rightarrow \eta_c$.

2.2.1. Thiết kế bộ điều khiển mờ thích nghi gián tiếp

Xét mô hình:

$$\dot{x} = f(x) + u \quad (12)$$

Trong đó, x là véc tơ các biến trạng thái, có chứa trạng thái của hệ thống x và trạng thái bên ngoài hệ thống. Đặt $e = x_m - x$ (với x là đầu ra thực tế của mô hình, x_m là đầu ra mong muốn của mô hình).

Hàm bất định $f(x)$ được xấp xỉ bởi hệ mờ như sau [17], [18]:

$$f(x) = (\theta^*)^T \zeta(x) + \epsilon. \quad (13)$$

Với θ^* là các véc tơ tham số tối ưu đầu ra của hệ mờ, $\zeta(x)$ là véc tơ các độ thỏa mãn đầu vào của hệ mờ hay véc tơ hàm cơ sở, ϵ là sai số xấp xỉ hàm của hệ mờ.

Định lý 1: Sai số điều khiển bám e sẽ hội tụ về vùng chứa gốc 0 nếu bộ điều khiển mờ thích nghi được thiết kế như sau:

$$u = -\hat{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) + \dot{x}_m + ke, \quad (14)$$

với $\hat{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x})$ và luật chỉnh định thích nghi là:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = -\gamma e \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}), \quad (15)$$

trong đó $\gamma > 0$ và $k > 0$.

Chứng minh:

Với luật điều khiển (14), ta có: $\dot{e} = -ke + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}) - \epsilon$, trong đó, $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^*$.

Chọn hàm Lyapunov: $V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \tilde{\boldsymbol{\theta}}$.

Đạo hàm của hàm Lyapunov, ta được:

$$\dot{V} = e\dot{e} + \frac{1}{\gamma}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} = -ke^2 - e\epsilon + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \left[e\boldsymbol{\zeta}(\mathbf{x}) + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}} \right]$$

Thay luật thích nghi (15) vào $\dot{V}$, ta có: $\dot{V} = -ke^2 - e\epsilon$.

Khi $e \notin \Gamma = \left\{ e \mid |e| \leq \frac{|\epsilon|}{k} \right\}$ thì $\dot{V} < 0$, do đó, e hội tụ về vùng chứa gốc Γ . Ta có điều phải chứng minh.

Miền Γ có bán kính càng nhỏ khi chọn k càng lớn.

2.2.2. Áp dụng cho điều khiển vòng động lực học của xe

Vòng động lực học của xe có hai đầu vào và hai đầu ra. Tách hệ (11) thành hai hệ con và áp dụng Định lý 1 ở trên cho mỗi hệ con, trong đó, véc tơ hàm cơ sở được thiết kế giống nhau cho mỗi hệ con.

Các hàm liên thuộc cho vận tốc tuyến tính v :

$$\begin{aligned} v_a(v) &= \text{gauss}(v, [0,05; -1]) \\ v_k(v) &= \text{gauss}(v, [0,05; 0]) \\ v_d(v) &= \text{gauss}(v, [0,05; 1]), \end{aligned} \quad (16)$$

trong đó, hàm $\text{gauss}(v, [\sigma; c]) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-c}{\sigma}\right)^2}$.

Các hàm liên thuộc cho vận tốc góc ω :

$$\begin{aligned} \omega_a(\omega) &= \text{gauss}(\omega, [0,05; -5]) \\ \omega_k(\omega) &= \text{gauss}(\omega, [0,05; 0]) \\ \omega_d(\omega) &= \text{gauss}(\omega, [0,05; 5]) \end{aligned} \quad (17)$$

Véc tơ hàm cơ sở:

$$\boldsymbol{\zeta}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_k \\ \omega_d \\ v_a \omega_a \\ v_a \omega_k \\ v_a \omega_d \\ v_k \omega_a \\ v_k \omega_k \\ v_k \omega_d \\ v_d \omega_a \\ v_d \omega_k \\ v_d \omega_d \end{bmatrix} \quad (18)$$

Bộ điều khiển mờ thích nghi gián tiếp có dạng như sau:

$$\mathbf{u} = -\boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\zeta}(\boldsymbol{\eta}) + \dot{\boldsymbol{\eta}}_c + k\mathbf{e} \quad (19)$$

với $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]$, $\dot{\eta}_c = \begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \end{bmatrix}$; $e = \eta_c - \eta = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$ và k là hằng số dương. Luật chỉnh định thích nghi:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_1 &= -\gamma_1 e_1 \zeta(\eta) \\ \dot{\theta}_2 &= -\gamma_2 e_2 \zeta(\eta)\end{aligned}\quad (21)$$

Trong đó, γ_1 và γ_2 là các hằng số dương.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Kết quả nghiên cứu được thu thập dựa trên mô phỏng sử dụng phần mềm MATLAB.

3.1. Thông số mô phỏng

Quỹ đạo tham chiếu và nhiễu ngoài chưa biết trước được giả định như trong biểu thức (22) và (23) tương ứng:

$$\begin{aligned}x_d(t) &= 0,2t + 0,3 \\ y_d(t) &= 0,5 + 0,25\sin(0,2\pi t)\end{aligned}\quad (22)$$

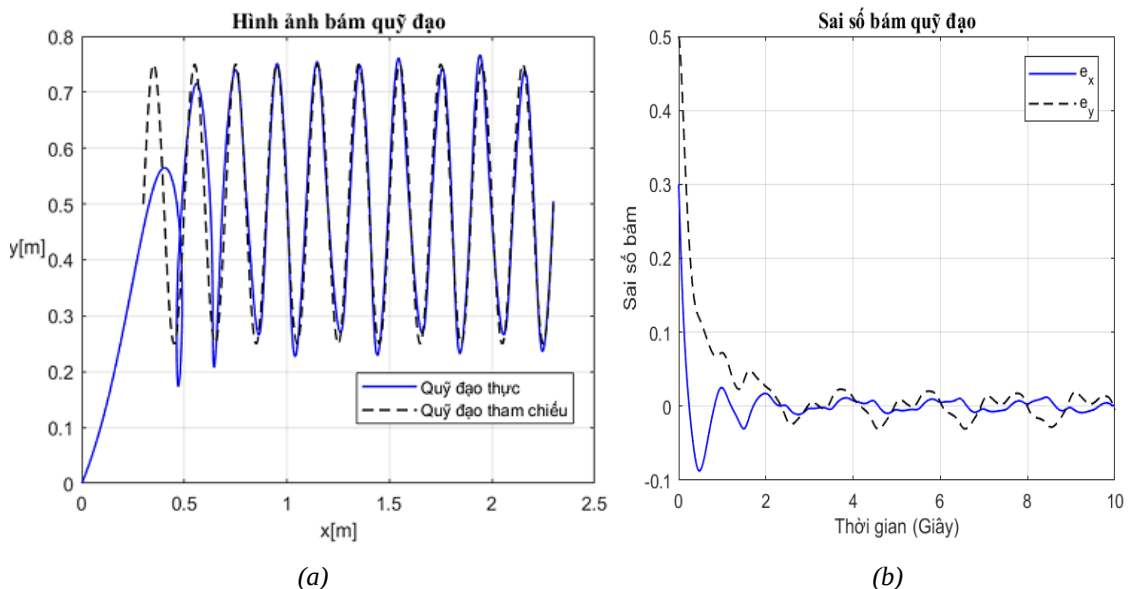
$$\tau_d = \begin{bmatrix} 10 \sin 3t \\ 10 \cos 3t \end{bmatrix}\quad (23)$$

Các tham số mô hình và bộ điều khiển được lựa chọn như trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số mô hình, quỹ đạo, nhiễu và bộ điều khiển

Mô hình robot	Bộ điều khiển vận tốc	Bộ điều khiển mô men
$b = 0,75 \pm 0,075 \text{ m}$	$k_x = 5$	$k = 100$
$r = 0,15 \pm 0,015 \text{ m}$	$k_y = 6$	$\gamma_1 = 0,1$
$d = 0,3 \pm 0,03 \text{ m}$	$k_\varphi = 8$	$\gamma_2 = 0,1$
$m = 32 \pm 10 \text{ kg}$		
$I = 19,635 \pm 10,9 \text{ kg.m}^2$		

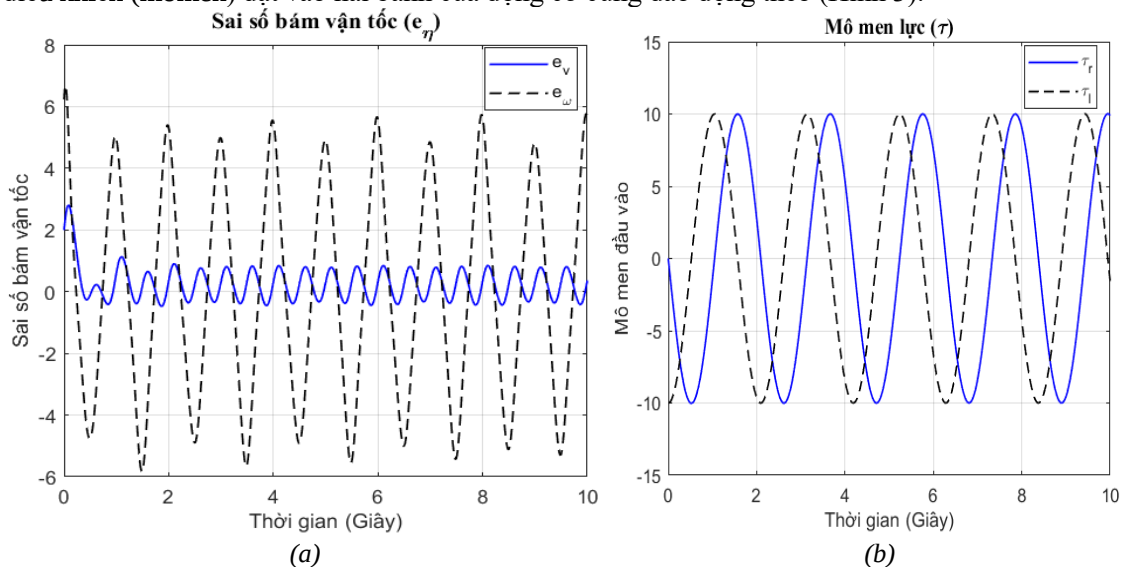
3.2. Kết quả mô phỏng



Hình 2. Quỹ đạo thực và quỹ đạo tham chiếu: (a) hình ảnh bám quỹ đạo và (b) sai số bám

Hình 2 và Hình 3 cho thấy kết quả điều khiển bám quỹ đạo robot khi áp dụng bộ điều khiển vòng ngoài (5) và bộ điều khiển thích nghi vòng trong (14). Từ Hình 2 có thể thấy quỹ đạo

chuyển động thực tế bám tốt quỹ đạo chuyển động tham chiếu với sai số bám quỹ đạo tiến về giá trị nhỏ dưới 0,02 m sau khoảng thời gian ngắn xấp xỉ 1,5 giây và tiến sát về góc 0 sau khoảng thời gian xấp xỉ 2,5 giây. Điều này chứng minh khả năng ước lượng và bù nhiễu của bộ điều khiển khá tốt. Sai số bám quỹ đạo tăng tại các thời điểm chuyển hướng chuyển động của quỹ đạo tham chiếu do tính chất quỹ đạo tham chiếu biến thiên liên tục với giá trị sai số lớn nhất theo phương tịnh tiến xấp xỉ 0,03 m. Bộ điều khiển vòng ngoài có khả năng đưa sai số vòng ngoài (tức sai số bám vị trí) tiệm cận về gốc, trong khi bộ điều khiển thích nghi vòng trong chỉ có thể giúp cho sai số bám vận tốc tiến về một miền ổn định gần gốc. Kích thước miền này phụ thuộc vào sai số xấp xỉ bởi hệ suy luận mờ và hệ số khuếch đại điều khiển (k). Do đó, có thể thấy sai số bám quỹ đạo tại Hình 2 nhỏ hơn nhiều sai số bám vận tốc tại Hình 3. Ngoài ra, do còn tồn tại sai số bám vận tốc nên tín hiệu điều khiển (momen) đặt vào hai bánh của động cơ cũng dao động theo (Hình 3).



Hình 3. Điều khiển vòng trong: (a) sai số bám vận tốc và (b) tín hiệu đầu vào mô men

4. Kết luận

Kết quả mô phỏng điều khiển bám được thực hiện trong trường hợp giả định hàm động lực học chưa biết bao gồm khối lượng, momen quán tính và nhiễu ngoài đầu vào thay đổi liên tục theo thời gian. Mặc dù chịu tác động của yếu tố không mong muốn biến thiên điều hòa không ngừng nhưng bộ điều khiển thiết kế vẫn cho kết quả bám quỹ đạo tham chiếu với sai số bám quỹ đạo tiệm cận về vùng chứa gốc 0, chứng minh được khả năng xấp xỉ hàm phi tuyến và khả năng điều khiển kháng nhiễu của bộ điều khiển thích nghi gián tiếp dựa trên cơ chế thích nghi mờ.

Những hạn chế của phương pháp điều khiển đề xuất gồm: việc chọn số mệnh đề NẾU-THÌ, các dạng hàm liên thuộc đầu vào và tham số của chúng còn phụ thuộc vào kinh nghiệm và phương pháp thử sai; sai số tốc độ bị chặn bởi miền chứa gốc Γ mà không tiến về không được, điều này làm cho sai lệch quỹ đạo không tiến về không được. Hướng nghiên cứu tiếp theo là nâng cao chất lượng điều khiển bám ở vòng động lực học để sai lệch điều khiển tốc độ tiến về không thay vì bị chặn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài “Nghiên cứu, phát triển tổ hợp robot có tích hợp một số công nghệ chủ chốt của cách mạng công nghiệp lần thứ tư (CMCN 4.0), ứng dụng trong logistics”, mã số KC-4.0-34/19-25.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. M. Do and H. N. Nguyen, "Path tracking control approach and processing lumped disturbances for AGV in recent years: an Overview," in *Proc. the 2nd International Conference ICTA 2023*, Thai Nguyen (Viet Nam), 2023, pp. 180-198.
- [2] K. Yasmine, B. Mohamed, and D. Tarak, "Adaptive sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic mobile robot with uncertain kinematics and dynamics," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 32, no. 9, pp. 924-938, 2018.
- [3] B. Moudoud, H. Aissaoui, and M. Diany, "Robust adaptive trajectory tracking control based on sliding mode of electrical wheeled mobile robot," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 10, no. 9, pp. 505-509, 2021.
- [4] M. Brahim, A. Hicham, and D. Mohammed, "Extended state observer-based finite-time adaptive sliding mode control for wheeled mobile robot," *Journal of Control and Decision*, vol. 9, no. 4, pp. 465-476, 2022.
- [5] Y. Guo, L. Yu, and J. Xu, "Robust finite-time trajectory tracking control of wheeled mobile robots with parametric uncertainties and disturbances," *J. Syst. Sci. Complex*, vol. 32, no. 5, pp. 1358-1374, 2019.
- [6] G. K. Tran, H. N. Nguyen, and D. P. Nguyen, "Observer-based controllers for two-wheeled inverted robots with unknown input disturbance and model uncertainty," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2020, no. 1, pp. 1-12, 2020.
- [7] D. P. Nguyen and H. N. Nguyen, "A simple approach to estimate unmatched disturbances for nonlinear nonautonomous systems," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 32, no. 17, pp. 9160-9173, 2022.
- [8] J. K. Taheri and M. J. Khosrowjerdi, "Adaptive trajectory tracking control of wheeled mobile robots with disturbance observer," *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, vol. 28, no. 1, pp. 14-27, 2014.
- [9] N. T. T. Vu, X. L. Ong, N. H. Trinh, and S. T. H. Pham, "Robust adaptive controller for wheel mobile robot with disturbances and wheel slips," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 11, no. 1, pp. 336-346, 2021.
- [10] L. Li, W. Tianqi, X. Yuanqing, and Z. Ning, "Trajectory tracking control for wheeled mobile robots based on nonlinear disturbance observer with extended Kalman filter," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 357, no. 13, pp. 8491-8507, 2020.
- [11] M. Yue, L. Wang, and T. Ma, "Neural network based terminal sliding mode control for wmrs affected by an augmented ground friction with slippage effect," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 3, pp. 498-506, 2017.
- [12] Z. Chen, Y. Liu, W. He, H. Qiao, and H. Ji, "Adaptive-neural-network-based trajectory tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot with velocity constraints," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 5057-5067, 2020.
- [13] Y. Wu and Y. Wang, "Asymptotic tracking control of uncertain nonholonomic wheeled mobile robot with actuator saturation and external disturbances," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 12, pp. 8735-8745, 2020.
- [14] N. T. T. Vu, N. P. Tran, and N. H. Nguyen, "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Path Planning for Excavator Arm," *Journal of Robotics*, vol. 2018, no. 1, pp. 1-7, 2018.
- [15] D. Chwa, "Fuzzy adaptive tracking control of wheeled mobile robots with state-dependent kinematic and dynamic disturbances," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 587-593, 2011.
- [16] S. Peng and W. Shi, "Adaptive fuzzy integral terminal sliding mode control of a nonholonomic wheeled mobile robot," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, no. 1, 2017, Art. no. 3671846.
- [17] H. Ying, "General SISO Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent are universal approximators," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 582 - 587, 1998.
- [18] H. Ying, "Sufficient conditions on uniform approximation of multivariate functions by general Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 28, no.4, pp. 515 -520, 1998.