



DOI:10.22144/ctujos.2026.040

ĐIỀU KHIỂN ROBOT DI ĐỘNG THEO QUỸ ĐẠO CÓ XÉT ĐẾN CÁC YẾU TỐ NHIỄU TỪ BÊN NGOÀI

Trần Phước Lộc¹, Lưu Trọng Hiếu^{2*} và Ngô Quang Hiếu²

¹Học viên cao học ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động Hóa, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): luutronghieus@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 09/07/2025

Sửa bài (Revised): 04/08/2025

Duyệt đăng (Accepted): 08/01/2026

Title: Trajectory tracking control of mobile robots considering external disturbances

Author: Tran Phuoc Loc^{1*}, Luu Trong Hieu² and Ngo Quang Hieu²

Affiliation(s): ¹Graduate student in Control and Automation Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; ²College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động phi holonomic trong môi trường có nhiễu. Bộ điều khiển trượt động lực (Dynamic Sliding Mode Controller, DSMC) được kết hợp với kỹ thuật backstepping nhằm nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo và tăng khả năng chống nhiễu. Mô hình động lực học của robot được xây dựng theo phương pháp Lagrange, có xét đến quán tính, lực Coriolis và nhiễu ngoài. Luật điều khiển sử dụng mặt trượt kiểu PI để bảo đảm tính ổn định, trong khi hàm bão hòa được áp dụng để giảm hiện tượng chatter. Hiệu quả của phương pháp được đánh giá bằng mô phỏng trên MATLAB/Simulink với ba quỹ đạo gồm tròn, elip và hình chữ nhật, trong điều kiện có và không có nhiễu. Kết quả cho thấy hệ thống đạt thời gian đáp ứng dưới 1 s, sai số xác lập nhỏ hơn 0,02 m, hầu như không có độ vọt lố và vẫn duy trì được tính ổn định cao dưới tác động của nhiễu. Phương pháp đề xuất cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các hệ robot di động làm việc trong môi trường thực tế có bất định.

Từ khóa: Điều khiển trượt động lực học, backstepping, robot di động phi holonomic, bám quỹ đạo, nhiễu tác động từ môi trường ngoài

ABSTRACT

This study proposes a trajectory-tracking control method for nonholonomic mobile robots operating under external disturbances. A Dynamic Sliding Mode Controller (DSMC) combined with the backstepping technique is developed to improve tracking accuracy and disturbance rejection. The robot dynamic model is derived using the Lagrange method, taking inertia, Coriolis force, and external disturbances into account. A PI-type sliding surface is employed to ensure system stability, while a saturation function is introduced to reduce chattering. The effectiveness of the proposed controller is evaluated in MATLAB/Simulink using three reference trajectories, namely circular, elliptical, and rectangular paths, under both disturbed and disturbance-free conditions. Simulation results show that the system achieves a response time of less than 1 s, a steady-state error below 0.02 m, almost no overshoot, and high stability even in the presence of disturbances. These results indicate that the proposed method is a promising solution for trajectory-tracking control of mobile robots in practical environments with uncertainties.

Keywords: Non-holonomic mobile robot, dynamic sliding mode control, backstepping, trajectory tracking, disturbance uncertainties

1. GIỚI THIỆU

Robot di động có bánh xe (Nonholonomic-Wheel Mobile Robot - WMR) là một thiết bị cơ khí được thiết kế để thực hiện các nhiệm vụ từ đơn giản đến phức tạp, tùy thuộc vào yêu cầu của từng nhiệm vụ cụ thể. Robot di động được sử dụng trong nhiều lĩnh vực như logistics, y tế, nông nghiệp và thăm dò những khu vực nguy hiểm. Mỗi ứng dụng yêu cầu thiết kế phần cứng khác nhau để đảm bảo robot di chuyển linh hoạt và tương tác phù hợp với môi trường.

Trong nghiên cứu robot, điều khiển bám quỹ đạo là một chủ đề được nghiên cứu rộng rãi vì tính ứng dụng thực tiễn cao. Aydi et al. (2016) đã đề xuất phương pháp điều khiển robot di động phi-holonomic sử dụng bộ điều khiển trượt với cấu trúc được cải tiến. Thai et al. (2022) đã phát triển phương pháp bám quỹ đạo dựa trên PID cho WMR bằng cách điều chỉnh các thông số điều khiển khác nhau. Ngoài ra, Trang và Tùng (2022) giới thiệu giải pháp sử dụng bộ điều khiển trượt kết hợp mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF) nhằm nâng cao hiệu suất bám quỹ đạo trong các hệ có nhiều tín hiệu đầu vào. Một số nghiên cứu khác khi được thực hiện đã khám phá các kỹ thuật điều khiển khác nhau cho WMR, chẳng hạn như điều khiển tối ưu LQR (Klemm et al., 2020) và điều khiển backstepping (Zidani et al., 2015; Shojaei et al., 2011; Ye & Wang, 2020). Một số tác giả còn kết hợp điều khiển PID với điều khiển thích nghi để cải thiện khả năng bám quỹ đạo của robot (Cen & Singh, 2021), cũng như kết hợp bộ điều khiển mờ và mạng thần kinh để khử nhiễu ngoại cho robot có trượt ngang (Ha et al., 2024).

Mặc dù các phương pháp này đạt được những kết quả đáng khích lệ, nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế. Ví dụ, cấu trúc PID đơn giản thường gặp khó khăn khi xử lý các hệ phi tuyến do cần tinh chỉnh tham số chính xác (Thai et al., 2022). Trong khi đó, điều khiển trượt (SMC) được biết đến với khả năng chống nhiễu tốt, nhờ cơ chế điều khiển dựa trên bề mặt trượt giúp hệ thống duy trì ổn định trước các nhiễu loạn và mô hình không chính xác. Tuy nhiên, phương pháp này thường gây ra hiện tượng rung (chattering) – tức là các dao động tần số cao không mong muốn, như đã được Aydi et al. (2016) đề cập.

Tại Việt Nam, việc nghiên cứu về WMR cũng đã thu hút sự quan tâm. Một số công trình khi được thực hiện đã tập trung vào ứng dụng SLAM cho robot bốn bánh (Hieu et al., 2022) và xây dựng bản đồ trong khi di chuyển (Hieu & Cuong, 2024). Tuy

nhien, việc thực hiện các nghiên cứu này chủ yếu hướng đến thiết kế và điều khiển robot trong môi trường chưa biết trước, mà chưa quan tâm đến mô hình động học. Hiên và ctv. (2024) đã đề xuất một bộ điều khiển động lực học kết hợp cả mô hình động học và động lực học của robot nhằm nâng cao độ chính xác và tính ổn định.

Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây khi được tiến hành chủ yếu tập trung vào việc cải thiện hiệu suất bám quỹ đạo trong điều kiện lý tưởng và chưa xem xét đầy đủ ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài và sự không chắc chắn trong mô hình động học của robot. Để giải quyết vấn đề này, một phương pháp điều khiển trượt động lực học (DSMC) kết hợp với kỹ thuật Backstepping đã được đề xuất nhằm nâng cao khả năng chống nhiễu và độ chính xác trong điều khiển robot WMR. Khác với các công trình trước, phương pháp này còn tích hợp hàm bão hòa để giảm hiện tượng rung (chattering) – một yếu điểm thường gặp trong điều khiển trượt. Phương pháp đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng trong MATLAB/Simulink với nhiều dạng quỹ đạo khác nhau (tròn, elip, chữ nhật) trong cả hai điều kiện có nhiễu và không nhiễu, cho thấy tính hiệu quả và tiềm năng ứng dụng thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. The non-holonomic dynamic model

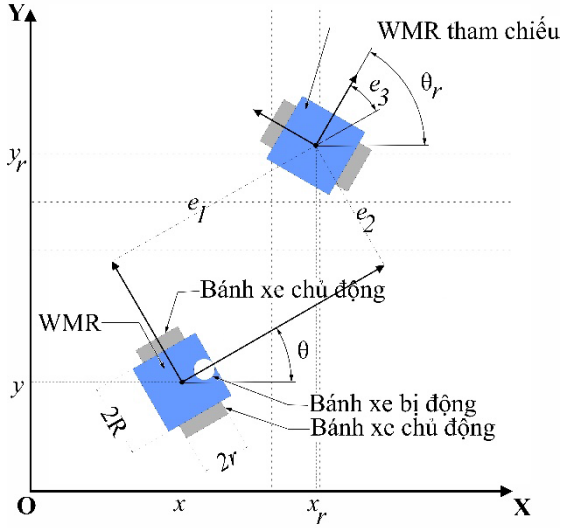
Robot di động có bánh xe (WMR) trong hệ tọa độ được xem xét như Hình 1. Mô hình WMR được sử dụng theo Zidani et al. (2015). Robot WMR gồm hai bánh chủ động và một bánh định hướng toàn phần (omnidirectional), giúp robot giữ thăng bằng và di chuyển mượt mà. Gọi R là khoảng cách từ tâm robot đến các bánh trái và phải và r là bán kính của các bánh chủ động. Mô hình này dựa trên nghiên cứu của Zidani et al., (2015), trong đó một bộ điều khiển backstepping đã được thiết kế nhằm nâng cao khả năng bám quỹ đạo và tính ổn định cho robot WMR.

Theo Hình 1, vị trí của robot di động có bánh xe (WMR) được xác định bởi phương trình:

$$q = [x \quad y \quad \theta]^T$$

Với x, y, θ lần lượt biểu thị vị trí của robot trong hệ tọa độ tham chiếu.

Phương trình động học thuận (forward kinematics) cho robot WMR được biểu diễn như sau:



Hình 1. Mô hình động học của robot di động có bánh xe (WMR).

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

Với $J(q)$ là ma trận Jacobian, v, ω lần lượt là vận tốc tuyến tính và vận tốc góc. Theo Fukao et al. (2000), phương trình mô hình động lực học của robot di động có bánh xe (WMR) được trình bày như sau:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \tau_d = B(q)\tau + A^T(q)\lambda \quad (2)$$

Trong đó:

- $M(q)$ là ma trận quán tính,
- $V(q, \dot{q})$ là ma trận lực Coriolis và lực ly tâm,
- τ_d là nhiễu loạn tác động lên hệ thống,
- τ là vector tín hiệu điều khiển,
- $B(q)$ là ma trận đầu vào của hệ số hệ thống, chứa các hệ số liên quan đến lực ly tâm và Coriolis.
- λ là vector các bội số Lagrange (Lagrange multipliers),
- $A^T(q)$ là ma trận ràng buộc (constraint matrix),
- $G(q)$ là vector trọng lực,

- $F(\dot{q})$ là vector ma sát với bề mặt,
- \dot{q}, \ddot{q} lần lượt là vector vận tốc và vector gia tốc.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A^T(q) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G(q) = 0 \quad (5)$$

$$B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta) \\ -\sin(\theta) & \sin(\theta) \\ R & -R \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$V(q, \dot{q}) = 0 \quad (7)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\lambda = -m(\dot{x}_c \cos(\theta) + \dot{y}_c \sin(\theta))\dot{\theta} \quad (9)$$

Trong đó, m là khối lượng của robot di động (WMR), I là mô-men quán tính của WMR quanh khối tâm.

$$A^T(q)\dot{q} = 0 \quad (10)$$

Và ma trận $J^T(q)$ là ma trận ánh xạ (mapping matrix):

$$J^T(q)A^T(q) = 0 \quad (11)$$

Nhân ma trận $J^T(q)$ vào phương trình (2), ta thu được ma trận hạ bậc:

$$\bar{M}(q)\dot{v} + \bar{V}(q, \dot{q})v + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{\tau}_d = \bar{B}(q)\tau \quad (12)$$

Trong đó: $\bar{M}, \bar{V}, \bar{F}(\dot{q}), \bar{\tau}_d, \bar{B}(q)$ là các ma trận bậc giảm (reduced-order matrices) tương ứng của $M(q), V(q, \dot{q}), F(\dot{q}), \tau_d, B(q)$. Giả sử không có nhiễu và tác động bên ngoài, phương trình có thể được viết lại như sau:

$$\dot{v} = E \cdot \tau(t) \quad (13)$$

Với:

$$E = \bar{M}^{-1}(q)\bar{B}(q) = \frac{1}{mrI} \begin{bmatrix} I & I \\ Rm & -Rm \end{bmatrix}$$

2.2. Điều khiển DSMC-Backstepping

2.2.1. Thiết kế hệ thống điều khiển cho robot di động có bánh xe (WMR)

Sai số giữa quỹ đạo mong muốn và quỹ đạo thực tế của robot di động được thể hiện trong Hình 1 như sau:

$$q_e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = R_z(q_r - q) \tag{14}$$

$$= R_z \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}$$

Với R_z là ma trận xoay quanh trục z:

$$\dot{q}_e = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} \dot{x}_r - \dot{x} \\ \dot{y}_r - \dot{y} \\ \dot{\theta}_r - \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$= R_z \begin{bmatrix} v_r \cos(\theta_r - \theta) \\ v_r \sin(\theta_r - \theta) \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} v_r + v \cos(e_3) + \omega e_2 \\ v_r \sin(e_3) - \omega e_1 \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix}$$

Từ việc tham khảo Hiền và ctv. (2024) để ổn định hệ thống, ta đặt $V_c = f(q_e, v_r, k)$, trong đó:

$$V_c = \begin{bmatrix} v_c \cos(e_3) + k_1 e_1 \\ \omega_r + k_2 v_r e_2 + k_3 v_r \sin(e_3) \end{bmatrix} \tag{16}$$

V_c được xét theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov: Ta chọn một hàm dương xác định (positive definite function) như sau:

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1 - \cos(e_3)}{k_2} \tag{17}$$

Từ phương trình (15) và (17), ta có:

$$\dot{V} = (v_r + v \cos(e_3) + \omega e_2)e_1 + (v_r \sin(e_3) - \omega e_1)e_2 + \frac{(\omega_r - \omega)\sin(e_3)}{k_2} \tag{18}$$

Từ phương trình (16) và (18), ta có:

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - \frac{k_3 v_r \sin(e_3)^2}{k_2} \tag{19}$$

Với $k = [k_1 \ k_2 \ k_3]$, $k_1, k_2, k_3 > 0$ và e_1, e_2, e_3 tiến tới 0 khi t khi tới tiến tới vô cực.

2.2.2. Thiết kế bộ điều khiển DSC cho robot di động có bánh xe (WMR) Sai số vận tốc điều khiển:

$$e_c(t) = \begin{bmatrix} e_{c1} \\ e_{c2} \end{bmatrix} = V_c(t) - V(t) \tag{20}$$

Vì mô hình điều khiển trượt cho robot di động là một hệ vi phân bậc nhất, nên chúng tôi chọn kiểu trượt PI cho mặt trượt như sau:

$$S(t) = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = e_c(t) + \beta \int_0^t e_c(\tau) d(\tau) \tag{21}$$

Với β là tham số tích phân của mặt trượt, trong đó $\beta > 0$.

Khi $S(t) = 0$, $e_c(t) = -\beta \int_0^t e_c(\tau) d(\tau)$ tiệm cận về 0 khi t tiến tới vô cùng.

Từ phương trình (13) và (21), ta có:

$$\dot{S}(t) = (\dot{V}_c(t) - E \cdot \tau(t)) - \beta e_c(t) \tag{22}$$

Vì vậy, luật điều khiển tương đương có thể được viết như sau:

$$\tau_{eq}(t) = E^{-1}(\dot{V}_c(t) + \beta e_c) \tag{23}$$

Và luật chuyển mạch biểu diễn như sau:

$$\tau_{sw}(t) = k \cdot \text{sgn}(S_i) \tag{24}$$

Với $k = \begin{bmatrix} k_a & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix}$ là tham số chuyển mạch, $\text{sgn}(S_i) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(S_1) \\ \text{sgn}(S_2) \end{bmatrix}$ là hàm dấu (sign function).

Phương trình (13) với nhiễu và tác động bên ngoài có thể được viết lại như sau:

$$\dot{v} = E \cdot \tau(t) + d_s(t) \tag{25}$$

$$\dot{v} = \bar{E} \cdot \tau(t) + \Delta E \cdot \tau(t) + d_s(t)$$

Trong đó, ΔE biểu thị các bất định (uncertainties), \bar{E} là mô hình động học lý tưởng, và $d_s(t)$ là vectơ nhiễu loạn bên ngoài (external disturbance vector). Gọi δ là vectơ nhiễu loạn bên ngoài:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1(t) \\ \delta_2(t) \end{bmatrix} = \Delta E \cdot \tau(t) + d_s(t) \tag{26}$$

Từ phương trình (25) và (26), ta có:

$$\dot{v} = \bar{E} \cdot \tau(t) + \delta(t) \tag{27}$$

Bộ điều khiển cho robot di động có bánh xe (WMR) được thiết kế như sau:

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \tau_{eq}(t) + \tau_{sw}(t) \\ &= E^{-1}(\dot{V}_c(t) + \beta e_c + k \cdot \text{sgn}(S_i)) \end{aligned} \quad (28)$$

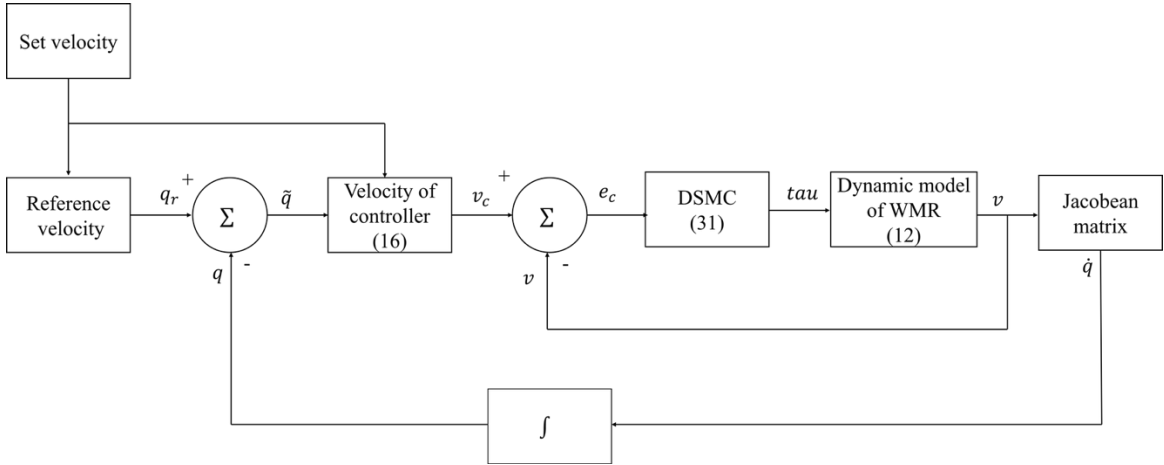
Để giảm hiện tượng chattering, hàm bão hòa được sử dụng như sau:

$$\text{sat}(S_i) = \begin{cases} \text{sgn}(S_i), & |S_i| > \varepsilon > 0 \\ \frac{S_i}{\varepsilon}, & |S_i| < \varepsilon \end{cases}, \quad (29)$$

$i=1,2$

Trong đó, ε là tham số bão hòa. Bộ điều khiển trượt động lực học được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \tau_{eq}(t) + \tau_{sw}(t) \\ &= E^{-1}(\dot{V}_c(t) + \beta e_c + k \cdot \text{sat}(S_i)) \end{aligned} \quad (30)$$



Hình 2. Sơ đồ điều khiển DSMC-Backstepping cho robot di động có bánh xe (WMR)

Sơ đồ điều khiển tổng thể của hệ thống WMR sử dụng phương pháp DSMC kết hợp Backstepping bao gồm các khối chức năng chính sau:

Khối tạo tín hiệu tham chiếu (Reference Generator) giúp tạo ra các tín hiệu mong muốn gồm tọa độ góc định hướng, vận tốc tịnh tiến và vận tốc góc theo thời gian. Đây là đầu vào để so sánh với trạng thái thực tế của robot nhằm tính toán sai số.

Khối bộ điều khiển vận tốc (Velocity Controller) có vai trò giúp biến đổi đầu ra của bộ điều khiển thành vận tốc bánh xe thực tế để điều khiển phân công hoặc mô phỏng robot.

Khối DSMC (Dynamic Sliding Mode Controller) là khối điều khiển chính, trong đó mặt trượt được thiết kế với thành phần tích phân để cải thiện khả năng chống nhiễu và bù trừ sai số ổn định hơn. Hàm bão hòa được sử dụng thay vì hàm dấu hiệu để giảm hiện tượng rung (chattering).

Khối Backstepping có vai trò hỗ trợ khối DSMC bằng cách xây dựng luật điều khiển từ đầu ra đến đầu vào thông qua việc thiết kế hàm Lyapunov từng bước, đảm bảo ổn định toàn cục và nâng cao độ chính xác cho hệ thống phi tuyến như WMR.

Khối tổng hợp tín hiệu điều khiển giúp kết hợp kết quả từ DSMC và Backstepping để tạo ra tín hiệu điều khiển cuối cùng đưa vào mô hình động lực học.

Khối mô hình robot WMR (WMR Dynamics) là khối mô phỏng hệ động lực học thực tế của robot với đầy đủ các yếu tố như lực quán tính, Coriolis, ma sát và nhiễu tác động. Đây là nơi áp dụng tín hiệu điều khiển để mô phỏng chuyển động thực tế của robot.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thông số của robot di động có bánh xe (WMR)

Thông số của robot di động có bánh xe (WMR) Để đánh giá khả năng đáp ứng của phương pháp đề xuất, một mô hình robot di động vi sai hai bánh được sử dụng trong môi trường mô phỏng. Các tham số chính của robot, bao gồm khối lượng, mô-men quán tính, khoảng cách hình học giữa hai bánh xe và bán kính bánh, được trình bày trong Bảng 1. Các thông số này là cơ sở để xây dựng mô hình mô phỏng và đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển.

Bảng 1. Thông số mô phỏng của robot di động có bánh xe (WMR)

Kí hiệu	Chú thích	Giá trị
m	Khối lượng của WMR	4 kg
I	Mô-men quán tính của WMR	2,5 kg m ²
R	Nửa khoảng cách giữa hai bánh xe	0,15 m
r	Bán kính bánh xe	0,03 m

Trong nghiên cứu này, ba dạng quỹ đạo gồm quỹ đạo tròn, quỹ đạo elip và quỹ đạo hình chữ nhật được lựa chọn để kiểm tra khả năng bám quỹ đạo của robot. Việc lựa chọn ba dạng quỹ đạo này nhằm đánh giá bộ điều khiển trong các tình huống có đặc điểm hình học khác nhau. Quỹ đạo tròn đại diện cho chuyển động có độ cong không đổi, phù hợp để đánh giá tính ổn định và độ mượt của đáp ứng điều khiển. Quỹ đạo elip có độ cong thay đổi liên tục, cho phép đánh giá khả năng thích nghi của bộ điều khiển trong quá trình robot chuyển động theo quỹ đạo cong phức tạp hơn. Trong khi đó, quỹ đạo hình chữ nhật bao gồm các đoạn thẳng kết hợp với các góc chuyển hướng đột ngột, do đó thích hợp để kiểm tra khả năng phản ứng nhanh và duy trì ổn định của hệ thống khi robot phải thay đổi hướng chuyển động.

Mô phỏng quỹ đạo của robot di động bao gồm:

- Quỹ đạo tròn: Tọa độ của tâm vòng tròn $B(0, 50)$ và $R = 50\text{ m}$.

- Quỹ đạo elip: Tọa độ của tâm elip $C(-50;0)$, $\frac{x^2}{25^2} + \frac{y^2}{50^2} = 1$.

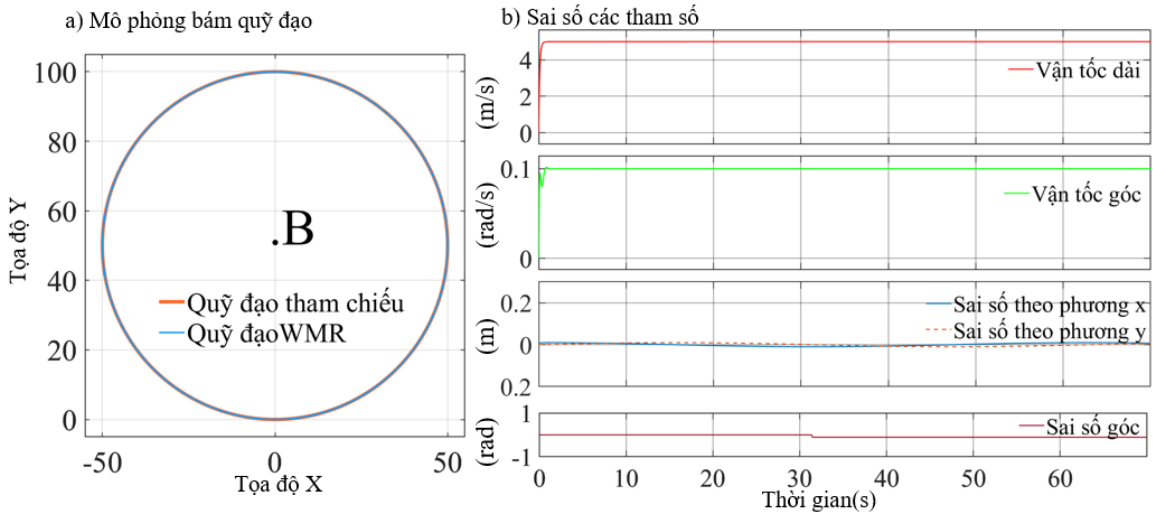
- Quỹ đạo hình chữ nhật: chiều dài 20 m và chiều rộng 15 m.

Chọn vị trí ban đầu của robot di động như sau: $q = [0 \ 0 \ 0]^T$

Dựa trên điều khiển backstepping (Zidani et al., 2015). Ta chọn thông số WMR theo Bảng 1 và các tham số điều khiển với: $k = [10 \ 5 \ 4]$. Vận tốc điều khiển: $V_r = \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0,1 \end{bmatrix}$.

3.2. Phản hồi của bộ điều khiển trong điều kiện không có nhiễu

Hình 3, Hình 4 và Hình 5 trình bày kết quả mô phỏng bám quỹ đạo của robot trong điều kiện không có nhiễu. Các kết quả cho thấy bộ điều khiển DSMC-backstepping có khả năng dẫn robot bám sát quỹ đạo tham chiếu với sai số nhỏ và đáp ứng ổn định. Đối với quỹ đạo tròn (Hình 3), robot di chuyển tương đối mượt mà và nhanh chóng hội tụ về quỹ đạo mong muốn. Dao động của các tín hiệu điều khiển và sai số bám quỹ đạo là nhỏ, cho thấy hệ thống có khả năng duy trì ổn định tốt đối với dạng quỹ đạo có độ cong không đổi. Đối với quỹ đạo elip (Hình 4), do độ cong của quỹ đạo thay đổi liên tục, vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của robot dao động nhiều hơn so với trường hợp quỹ đạo tròn. Tuy nhiên, các dao động này chủ yếu xuất hiện ở giai đoạn đầu, sau đó giảm dần khi hệ thống đạt trạng thái ổn định.

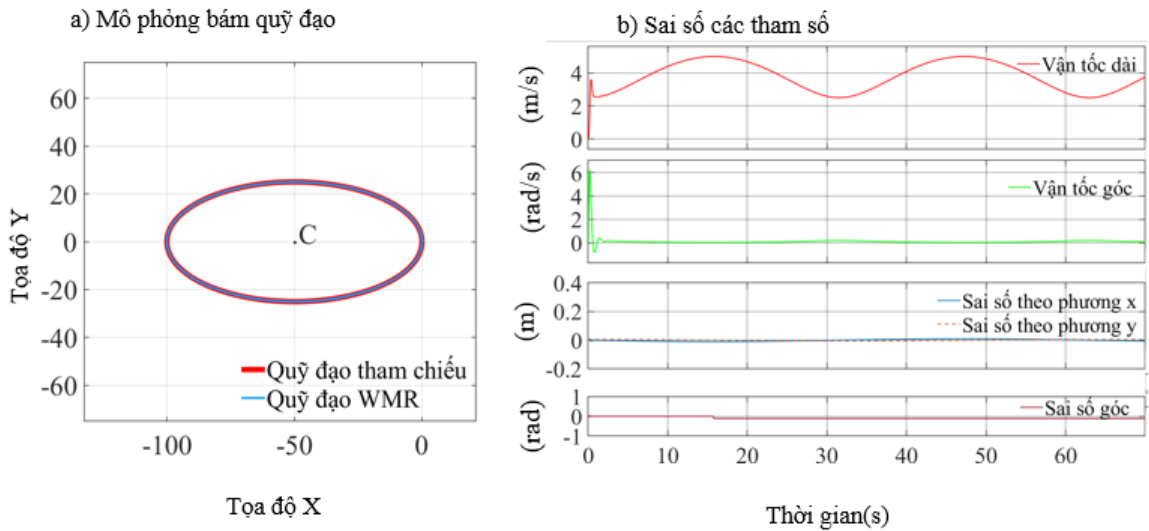


Hình 3. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo tròn trong điều kiện không có nhiễu

Ghi chú: (a) Quỹ đạo bám của robot, (b) Sai số bám quỹ đạo

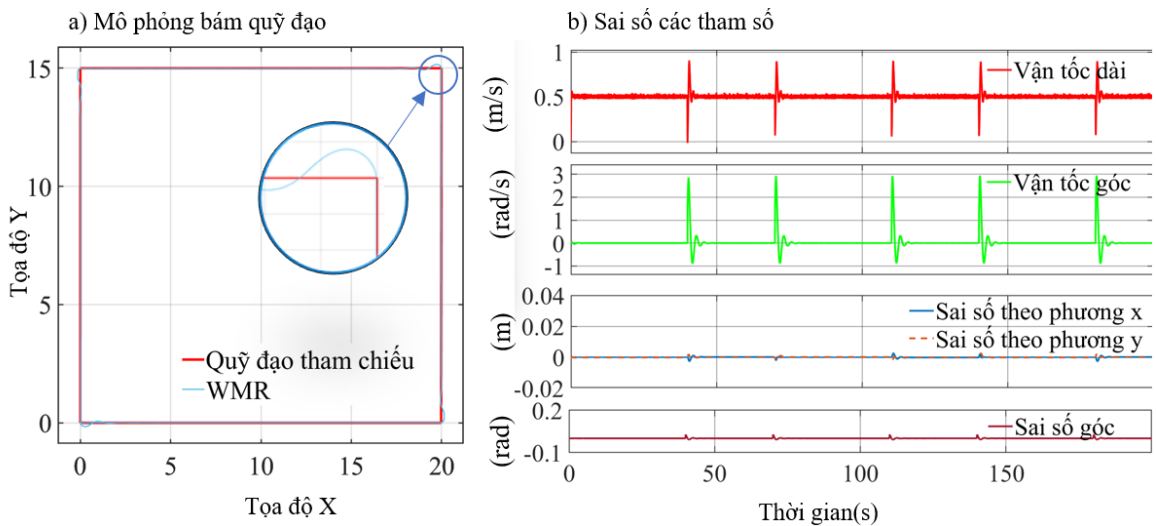
Sai số bám vẫn được duy trì ở mức thấp trong suốt quá trình chuyển động. Đối với quỹ đạo hình chữ nhật (Hình 5), dao động của hệ thống thể hiện rõ hơn tại các vị trí góc cua, nơi robot phải thay đổi hướng chuyển động một cách đột ngột. Điều này dẫn đến sự gia tăng tạm thời của vận tốc góc và sai số vị trí tại các thời điểm chuyển hướng. Tuy vậy, bộ điều khiển vẫn giúp robot nhanh chóng quay trở lại quỹ

đạo tham chiếu sau mỗi lần đổi hướng. Nhìn chung, trong điều kiện không có nhiễu, bộ điều khiển DSMC-backstepping cho thấy khả năng bám quỹ đạo tốt đối với cả ba dạng quỹ đạo khảo sát. Sai số giảm dần theo thời gian, hệ thống duy trì được tính ổn định trong suốt quá trình chuyển động, đồng thời thể hiện khả năng thích nghi phù hợp với các dạng quỹ đạo có đặc điểm hình học khác nhau.



Hình 4. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo elip trong điều kiện không có nhiễu

Ghi chú: (a) Quỹ đạo bám của robot, (b) Sai số bám quỹ đạo



Hình 5. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo hình chữ nhật trong điều kiện không có nhiễu

Ghi chú: (a) Quỹ đạo bám của robot, (b) Sai số bám quỹ đạo

3.3. Phản hồi của bộ điều khiển khi có nhiễu bên ngoài

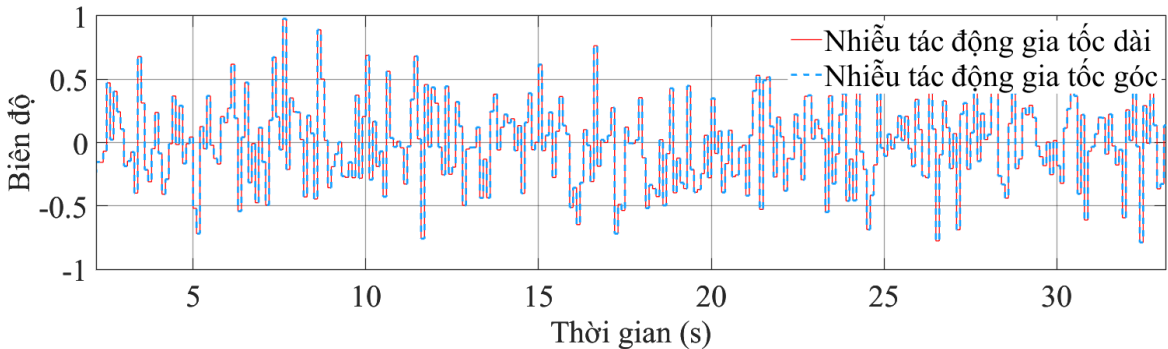
Tín hiệu nhiễu ngẫu nhiên tác động lên hệ thống được thể hiện trong Hình 6. Khi có nhiễu bên ngoài,

sai số bám quỹ đạo tăng lên so với trường hợp không có nhiễu, đặc biệt trong giai đoạn đầu khi bộ điều khiển chưa hội tụ hoàn toàn. Tuy nhiên, hệ thống vẫn duy trì được khả năng theo dõi quỹ đạo và nhanh

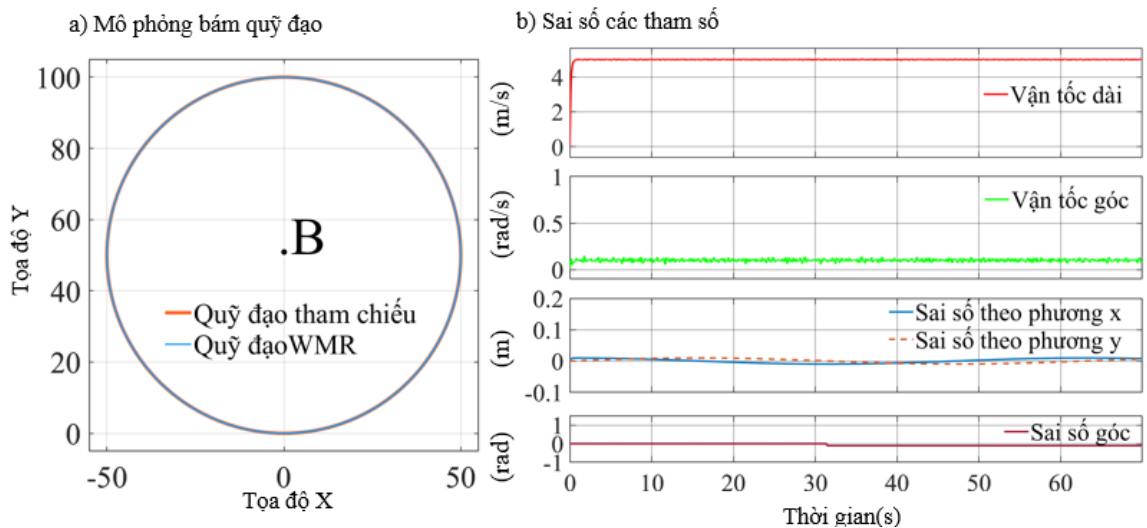
chóng tiến tới trạng thái ổn định. Kết quả mô phỏng trong điều kiện có nhiễu được trình bày ở Hình 7, Hình 8 và Hình 9 tương ứng với ba dạng quỹ đạo tròn, elip và hình chữ nhật. Các kết quả cho thấy, mặc dù nhiễu gây ra dao động nhất định trong vận tốc tuyến tính, vận tốc góc và sai số bám, các đại lượng này vẫn hội tụ về vùng giá trị ổn định sau một khoảng thời gian ngắn. Đối với quỹ đạo tròn (Hình 7), robot vẫn bám tốt quỹ đạo tham chiếu mặc dù xuất hiện dao động nhỏ do tác động của nhiễu. Sai số vị trí và sai số góc giảm nhanh theo thời gian, cho thấy bộ điều khiển có khả năng chống nhiễu hiệu quả đối với dạng quỹ đạo này. Đối với quỹ đạo elip (Hình 8), do đặc điểm thay đổi liên tục của độ cong, các tín hiệu điều khiển dao động rõ hơn so với quỹ đạo tròn. Tuy nhiên, hệ thống vẫn duy trì được độ ổn định và sai số bám quỹ đạo được không chế trong giới hạn nhỏ sau giai đoạn quá độ. Đối với quỹ đạo hình chữ nhật (Hình 9), ảnh hưởng của nhiễu kết hợp với sự thay đổi hướng đột ngột tại các góc cua làm

xuất hiện các đỉnh dao động rõ rệt hơn trong tín hiệu điều khiển và sai số bám.

Một điểm đáng chú ý là toàn bộ hệ thống đều đạt được trạng thái ổn định trong thời gian ngắn, chỉ sau khoảng 0,5 đến 1 giây đầu tiên. Trong mô phỏng với quỹ đạo hình tròn, vận tốc dài tăng vọt lên giá trị ổn định gần như tức thì, không có dao động hay vọt lố đáng kể. Vận tốc góc cũng nhanh chóng đạt được mức ổn định nhỏ. Sai số vị trí và sai số góc đều giảm nhanh về gần 0, chứng tỏ hệ thống điều khiển có sai số bám nhỏ ($< 0,02$ m) và thời gian xác lập ngắn dưới 1 s. Tương tự, với quỹ đạo hình elip, mặc dù vận tốc dài dao động điều hòa (do đặc tính quỹ đạo), nhưng các thông số điều khiển chính như vận tốc góc và sai số đều ổn định chỉ trong vòng chưa tới 1 giây. Không có dấu hiệu vọt lố, sai số cũng được không chế ở mức rất thấp xuyên suốt quá trình chuyển động.

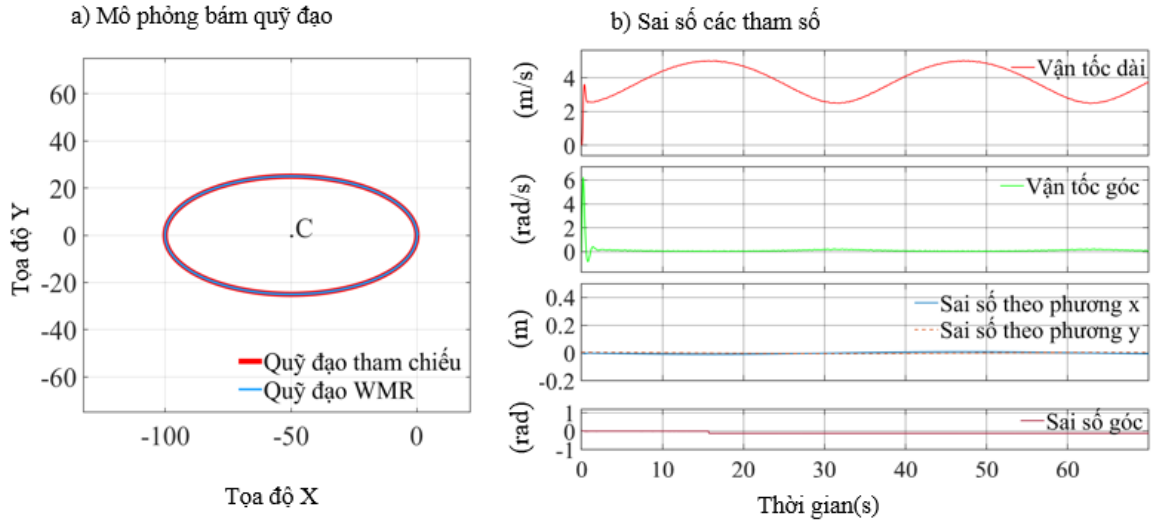


Hình 6. Tín hiệu nhiễu ngẫu nhiên tác động lên hệ thống



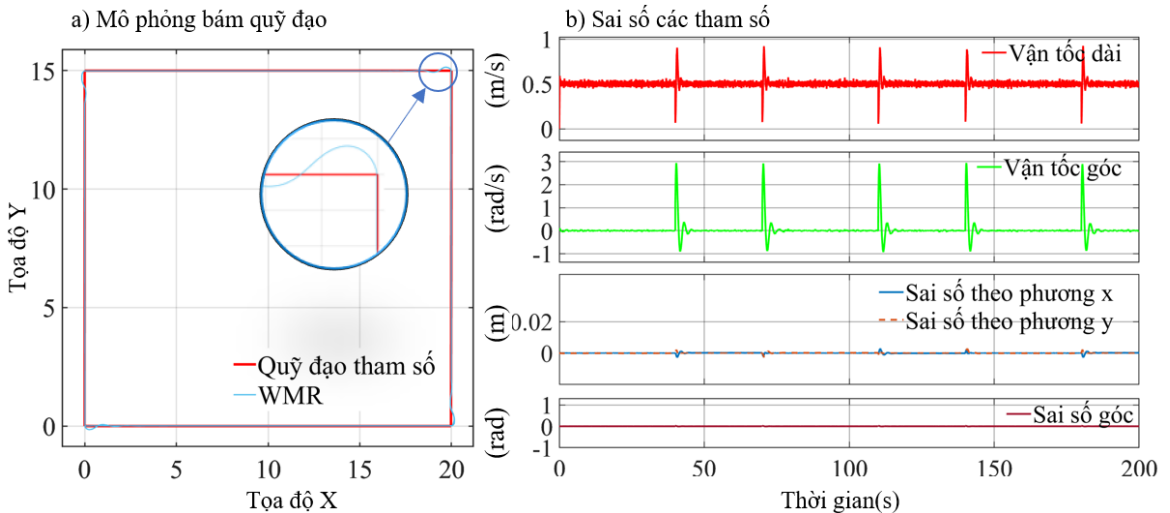
Hình 7. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo tròn trong điều kiện có nhiễu

Ghi chú: (a) Quỹ đạo bám của robot, (b) Sai số bám quỹ đạo



Hình 8. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo elip trong điều kiện có nhiễu

Ghi chú: (a) Quỹ đạo bám của robot, (b) Sai số bám quỹ đạo



Hình 9. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo hình chữ nhật trong điều kiện có nhiễu

Ghi chú: (a) Quỹ đạo bám của robot, (b) Sai số bám quỹ đạo

Việc mô phỏng với quỹ đạo hình chữ nhật cho thấy các xung rõ ràng tại thời điểm chuyển góc, phản ánh đúng yêu cầu điều khiển phải thay đổi hướng đột ngột. Dù có những biến thiên lớn tại các điểm rẽ, hệ thống vẫn quay lại trạng thái ổn định cực kỳ nhanh chóng sau mỗi lần chuyển góc. Đặc biệt, sai số vị trí luôn duy trì dưới mức $\pm 0,02$ và sai số góc gần như bằng 0 cho thấy hệ thống điều khiển có độ chính xác rất cao.

Tổng thể, bộ điều khiển vẫn bảo đảm robot nhanh chóng quay lại quỹ đạo mong muốn sau mỗi lần chuyển hướng, cho thấy tính bền vững của

phương pháp đề xuất. Tổng thể, các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển DSMC-backstepping có khả năng giảm ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài và duy trì tính ổn định cho hệ thống. Sai số bám quỹ đạo được giữ ở mức thấp, thời gian xác lập ngắn và hiện tượng rung được hạn chế. Điều này cho thấy phương pháp điều khiển đề xuất có tiềm năng ứng dụng đối với các hệ robot di động làm việc trong môi trường có nhiễu và bất định.

3.4. So sánh với các nghiên cứu khác

Bảng 2 trình bày sự so sánh giữa phương pháp đề xuất và một số nghiên cứu trước đây. Kết quả cho

thấy phương pháp PID trong Thai et al. (2022) cho đáp ứng tương đối tốt, tuy nhiên thời gian tăng và thời gian xác lập vẫn còn lớn, lần lượt khoảng 2,1 s và 3,7 s, với sai số xác lập khoảng 0,07 m. Trong nghiên cứu của Do et al. (2014), bộ điều khiển Fuzzy-PID giúp cải thiện tốc độ đáp ứng và giảm sai số so với PID truyền thống, nhưng vẫn xuất hiện độ vọt lố khoảng 3,5% và khả năng chống nhiễu chưa được đánh giá sâu. Đối với phương pháp backstepping của Zidani et al. (2015), hệ thống đạt được khả năng bám quỹ đạo ổn định, nhưng thời gian xác lập vẫn còn vào khoảng 4 s và chưa xử lý đầy đủ ảnh hưởng của nhiễu cũng như các bất định của mô hình. So với các phương pháp nêu trên, bộ

điều khiển DSMC-backstepping trong nghiên cứu này kết hợp ưu điểm của điều khiển trượt động lực học và kỹ thuật backstepping nhằm nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo, tăng khả năng chống nhiễu và giảm hiện tượng rung. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất đạt thời gian tăng và thời gian xác lập dưới 1 s, sai số xác lập nhỏ hơn 0,02 m và hầu như không xuất hiện độ vọt lố. Ngoài ra, hệ thống vẫn duy trì được tính ổn định khi chịu tác động của nhiễu ngẫu nhiên từ bên ngoài. Những kết quả này cho thấy phương pháp đề xuất có hiệu quả cao và là một hướng tiếp cận phù hợp cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo robot di động trong điều kiện làm việc thực tế.

Bảng 2. So sánh với các nghiên cứu khác

Tiêu chí đánh giá	PID (Thai et al. 2022)	Fuzzy-PID (Do Tiep et al. 2014)	Backstepping (Zidani et al., 2015)	Nghiên cứu của nhóm
Thời gian tăng (s)	≈ 2,1	≈ 1,8	≈ 2	< 1
Thời gian xác lập (s)	≈ 3,7	≈ 2,9	≈ 4	< 1
Sai số xác lập (m)	≈ 0,07	≈ 0,05	< 0,1	< 0,02
Độ vọt lố (Overshoot) (%)	≈ 5,8	≈ 3,5	Không đề cập	Hầu như không có

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày một phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động có bánh xe trong điều kiện có xét đến nhiễu từ bên ngoài. Bộ điều khiển DSMC-backstepping được xây dựng trên cơ sở kết hợp giữa điều khiển trượt động lực học và kỹ thuật backstepping nhằm nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo, cải thiện tính ổn định và tăng khả năng chống nhiễu của hệ thống.

Bộ điều khiển được kiểm chứng thông qua mô phỏng với ba loại quỹ đạo điển hình: hình tròn, hình elip và hình chữ nhật, trong điều kiện có nhiễu. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống đạt hiệu suất cao với thời gian đáp ứng nhanh, sai số bám duy trì dưới ±0,02 m, gần như không có độ vọt lố và dao động điều khiển thấp. Ngay cả khi có nhiễu ngẫu nhiên

tác động từ môi trường, hệ thống vẫn duy trì được tính ổn định và nhanh chóng hội tụ trở lại quỹ đạo mong muốn. So sánh với một số nghiên cứu trước đây cũng cho thấy phương pháp đề xuất đạt các chỉ tiêu đáp ứng tốt hơn về thời gian tăng, thời gian xác lập, sai số xác lập và độ vọt lố. Điều này khẳng định rằng bộ điều khiển DSMC-backstepping là một giải pháp hiệu quả cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo của robot di động có bánh xe trong môi trường có nhiễu. Trong thời gian tới, phương pháp này có thể được mở rộng để kiểm chứng trên mô hình thực nghiệm và xem xét trong các điều kiện làm việc phức tạp hơn.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ của Quỹ Đổi mới Sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2023.ThS.077.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Aydi, A., Djemel, M., & Chtourou, M. (2016). Robust sliding mode control for nonlinear uncertain discrete-time systems. In *17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)* (pp. 657–662). IEEE. <https://doi.org/10.4236/ica.2015.61009>

Cen, H., & Singh, B. K. (2021). Nonholonomic wheeled mobile robot trajectory tracking control based on improved sliding mode variable structure. *Wireless Communications and Mobile*

Computing, Article ID 2974839 <https://doi.org/10.1155/2021/2974839>

Fukao, T., Nakagawa, H., & Adachi, N. (2000). Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(5), 609–615. <https://doi.org/10.1109/70.880805>

Ha, V. T., Thuong, T. T., Thanh, N. T., & Vinh, V. Q. (2024). Research on Some Control Algorithms to Compensate for the Negative Effects of Model Uncertainty Parameters,

- External Interference, and Wheeled Slip for Mobile Robot. *Actuators*, 13, Article ID 31. <https://doi.org/10.3390/act13010031>
- Hieu, L. T., & Cuong, N. H. (2024). So sánh chất lượng bản đồ 2D và 3D từ robot di động. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng*, 22(10), 13–17. <https://jst-ud.vn/jst-ud/article/view/9295>
- Hieu, L. T., Thanh, V. C., Nhut, N. M., & Nguyen, N. K. (2022). Thiết kế robot di động SLAM sử dụng ROS với cơ cấu bốn bánh. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Thái Nguyên*, 227(11), 42–49. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6113>
- Hiên, N. T., Hà, V. T., Lap, V. Q., & Hải, B. H. (2024). Thiết kế và phát triển điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động dựa trên mạng nơron chịu tác động các thông số bất định và nhiễu loạn. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Công nghiệp Hà Nội*, 60(9), 3-11. <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2024.286>
- Klemm, V., Morra, A., Gallenmuller, L., Mannhart, D., Rohr, D., Kamel, M., Viragh, Y., & Siegart, R. (2020). LQR-assisted whole-body control of a wheeled bipedal robot with kinematic loops. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 3745–3752. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2979625>
- Pham, T. T., Le, M. T., & Nguyen, C. N. (2021). Omnidirectional mobile robot trajectory tracking control with diversity of inputs. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 10(11), 346–352. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.11.639-644>
- Shojaei, K., Shahri, A. M., Tarakameh, A., & Tabibian, B. (2011). Adaptive trajectory tracking control of a differential drive wheeled mobile robot. *Robotica*, 29(3), 391–402. <https://doi.org/10.1017/S0263574710000202>
- Thai, N. H., Ly, T. T. K., Thiên, H., & Dzung, L. Q. (2022). Trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a variable parameter PID controller. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 11(8), 1369–1374. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.614-621>
- Trang, T. T. T., & Tùng, P. T. (2022). Điều khiển trượt PID cho robot di động toàn hướng. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Thái Nguyên*, 227(8), 123–130. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5460>
- Ye, H., & Wang, S. (2020). Trajectory tracking control for nonholonomic wheeled mobile robots with external disturbances and parameter uncertainties. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 18, 3015–3022. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0643-y>
- Zidani, G., Drid, S., Chrifi-Alaoui, L., Benmakhlouf, A., & Chaouch, S. (2015). Backstepping controller for a wheeled mobile robot. In *2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 443–448). <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2015.7153286>
- Do, T. T., Phung, M. D., Ha, C. T., & Nguyen, H. X. (2014). A novel fuzzy–PID controller for mobile robot trajectory tracking. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(9), 148. <https://doi.org/10.5772/58991>