

ROBUST ADAPTIVE CONTROL FOR TWO-WHEELED DIFFERENTIAL MOBILE ROBOT WITH MODEL UNCERTAINTY, EXTERNAL DISTURBANCE AND WHEEL SLIP BASED ON SLIDING MODE CONTROLLER AND NEURAL NETWORK

Doan Van Hoa*, Le Thi Hoan

University of Economics – Technology for Industries

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 21/3/2025 Revised: 09/7/2025 Published: 09/7/2025 KEYWORDS Adaptive control Sliding mode control Two-wheeled differential mobile robot Wheel slips Radial basis function neural network	This paper presents a robust adaptive control method, focusing on the use of sliding mode control techniques combined with radial basis function neural networks. The method is designed for two-wheeled differential mobile robots, a type of robot commonly used in autonomous mobility applications. One of the strengths of this method is its ability to effectively address the challenges faced by robots, including external environmental disturbances, model uncertainty, and wheel slippage. These factors often cause great difficulties in maintaining stability and control performance for robots. The stability of the closed-loop system has been proven through the application of the Lyapunov criterion, an important tool in control system theory. To test the effectiveness of the proposed control method, simulation results have been performed on the Matlab – Simulink platform. In these experiments, the robot's ability to move stably along various trajectories was tested, including circular and trifolium trajectories. These results not only confirm the rationality of the method but also show its superior performance in maintaining stable control operation for the three-wheeled mobile robot with approximately zero tracking error.

ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI BỀN VỮNG CHO ROBOT DI ĐỘNG VI SAI HAI BÁNH CÓ MÔ HÌNH BẤT ĐỊNH, NHIỀU NGOÀI VÀ TRƯỢT BÁNH XE TRÊN CƠ SỞ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VÀ MẠNG NƠ RON

Doãn Văn Hóa*, Lê Thị Hoàn

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 21/3/2025 Ngày hoàn thiện: 09/7/2025 Ngày đăng: 09/7/2025 TỪ KHÓA Điều khiển thích nghi Điều khiển trượt Robot di động vi sai hai bánh Trượt bánh xe Mạng nơ ron hàm cơ sở xuyên tâm	Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển thích nghi bền vững, tập trung vào việc sử dụng kỹ thuật điều khiển trượt kết hợp với mạng nơ ron hàm cơ sở xuyên tâm. Phương pháp này được thiết kế cho các robot di động vi sai hai bánh, một loại robot thường gặp trong các ứng dụng di chuyển tự động. Một trong những điểm mạnh của phương pháp này là khả năng giải quyết hiệu quả các thách thức mà robot gặp phải, bao gồm nhiễu từ môi trường bên ngoài, sự không chắc chắn của mô hình và hiện tượng trượt bánh xe. Những yếu tố này thường gây ra những khó khăn lớn trong việc duy trì ổn định và hiệu suất điều khiển cho robot. Tính ổn định của hệ thống vòng kín đã được chứng minh thông qua việc áp dụng tiêu chuẩn Lyapunov, một công cụ quan trọng trong lý thuyết hệ thống điều khiển. Để kiểm tra tính hiệu quả của phương pháp điều khiển được đề xuất, các kết quả mô phỏng đã được thực hiện trên nền tảng Matlab – Simulink. Trong các thử nghiệm này, robot được kiểm tra khả năng di chuyển ổn định theo các quỹ đạo khác nhau, bao gồm quỹ đạo hình tròn và hình ba lá. Các kết quả này không chỉ xác nhận tính hợp lý của phương pháp mà còn cho thấy hiệu suất vượt trội của nó trong việc duy trì hoạt động điều khiển ổn định cho robot di động vi sai hai bánh với sai số bám xấp xỉ bằng không.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12361>

* Corresponding author. Email: rvhoa@uneti.edu.vn

1. Giới thiệu

Robot di động kiểu bánh xe (WMR) là loại robot có khả năng tự di chuyển từ điểm này đến điểm khác mà không cần sự can thiệp từ bên ngoài [1]. Điểm khác biệt lớn nhất so với các tay máy công nghiệp là WMR có thể tự do di chuyển trong một không gian làm việc xác định để thực hiện các mục tiêu cụ thể.

Các nghiên cứu trước đây thường tập trung vào việc thiết kế bộ điều khiển dựa trên mô hình động học hoặc động lực học một cách riêng biệt, mà ít chú ý đến sự tương tác giữa hai khía cạnh này. Những nghiên cứu này thường bỏ qua yếu tố trượt bánh xe, một vấn đề quan trọng trong việc điều khiển robot di động, và chỉ tập trung vào việc bù sai lệch mô hình, nhiễu hằng hoặc các tham số không chắc chắn trong mô hình [2] – [12]. Tuy nhiên, trong thực tế, WMR thường xuyên phải hoạt động trong các điều kiện khắc nghiệt và không lường trước được, chẳng hạn như di chuyển trên bề mặt trơn trượt hoặc thực hiện các động tác quay. Những yếu tố này có thể ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ và vị trí của robot, dẫn đến sự sai lệch so với quỹ đạo mong muốn. Việc không xem xét ảnh hưởng của trượt bánh xe trong quá trình thiết kế bộ điều khiển có thể làm giảm hiệu quả và độ tin cậy của các hệ thống này trong môi trường thực tế. Do đó, cần một cách tiếp cận toàn diện và tích hợp hơn để giải quyết vấn đề này, nhằm nâng cao khả năng hoạt động và ổn định của WMR trong những điều kiện không thuận lợi.

Để giải quyết vấn đề này, một số nghiên cứu đã sử dụng các cảm biến đắt tiền để đo trực tiếp vận tốc và gia tốc trượt [13], [14]. Một hướng tiếp cận khác là sử dụng bộ điều khiển để bù gián tiếp, và đã có một số kết quả đáng chú ý [15] – [17]. Ví dụ, trong [15], một bộ điều khiển thích nghi sử dụng mạng nơ-ron để ước lượng nhiễu và trượt bánh xe đã được đề xuất. Mặc dù kết quả mô phỏng cho thấy khả năng bám quỹ đạo tốt, nhưng khối lượng tính toán của mạng nơ-ron lại khá lớn. Trong [16], hệ logic mờ loại 2 kết hợp với điều khiển thích nghi đã được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển cho WMR, mang lại chất lượng bám tốt. Tuy nhiên, cấu trúc hai vòng điều khiển khiến việc chứng minh tính ổn định của hệ thống trở nên phức tạp. Trong [17], điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát nhiễu đã được sử dụng để bù các thông số mô hình không chắc chắn, giúp loại bỏ sai số và cải thiện hiệu suất hệ thống. Tuy nhiên, phương pháp này giả định rằng trượt bánh xe và nhiễu chỉ xuất hiện trong vòng điều khiển động lực học.

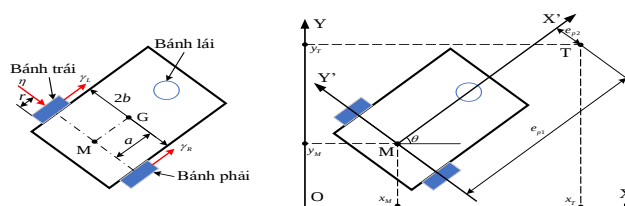
Xuất phát từ những phân tích trên, bài báo này đề xuất một bộ điều khiển thích nghi bền vững để điều khiển bám cho robot di động vi sai hai bánh (TWDMR), có tính đến ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài, trượt bánh xe và các tham số mô hình không chắc chắn. Hơn nữa, sơ đồ điều khiển được thiết kế với một vòng điều khiển duy nhất, giúp giảm đáng kể độ phức tạp trong chứng minh toán học so với các phương pháp sử dụng hai vòng điều khiển.

Bố cục của bài báo được tổ chức như sau: Phần hai trình bày thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững dựa trên điều khiển trượt và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBF) để điều khiển bám quỹ đạo cho TWDMR. Phần ba trình bày các kết quả mô phỏng. Cuối cùng, phần bốn đưa ra kết luận của bài báo.

2. Thiết kế bộ điều khiển thích nghi bền vững

2.1. Mô hình toán học của robot di động ba bánh

Xét cơ cấu robot di động ba bánh, hai bánh truyền động độc lập ở phía sau và một bánh lái ở phía trước, chịu ràng buộc nonholonomic như Hình 1.



Hình 1. Mô hình robot di động ba bánh và hệ trục tọa độ

Với G là trọng tâm của phần cứng TWDMR, $M(x_M, y_M)$ là trung điểm của đoạn trục nối hai bánh xe sau. Khoảng cách giữa hai bánh xe sau là $2b$, r là bán kính của mỗi bánh xe, a là khoảng cách giữa điểm M và điểm G , θ là góc hướng của WMR.

Gọi vận tốc góc của động cơ bánh xe bên phải, bên trái lần lượt là $\dot{\phi}_R$ và $\dot{\phi}_L$. Độ trượt dọc trục của bánh xe bên phải và bên trái là γ_R và γ_L , độ trượt ngang trục bánh xe là η .

Phương trình động học của TWDMR khi xét đến ảnh hưởng của trượt bánh xe là [15]:

$$\begin{cases} \dot{x}_M = \vartheta \cos\theta - \eta \sin\theta \\ \dot{y}_M = \vartheta \sin\theta + \eta \cos\theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, ϑ là vận tốc tuyến tính theo hướng vuông góc với trục nối hai bánh xe sau và ω là vận tốc góc của TWDMR:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \frac{r(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)}{2} + \frac{\dot{\gamma}_R + \dot{\gamma}_L}{2} \\ \omega &= \frac{r(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)}{2b} + \frac{\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L}{2b} \end{aligned} \quad (2)$$

Phương trình động lực học của TWDMR là [15]:

$$M\dot{v} + Bv + Q\ddot{v} + C\dot{\eta} + G\ddot{\eta} + \tau_d = \tau \quad (3)$$

trong đó: τ_d là nhiễu đầu vào, $v = [\dot{\phi}_R \quad \dot{\phi}_L]^T$, $\gamma = [\gamma_R \quad \gamma_L]^T$

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, m_{11} = m_{22}, m_{12} = m_{21} \\ m_{11} &= m_G \left(\frac{r^2}{4} + \frac{ar^2}{4b^2} \right) + \frac{r^2}{4b^2} (I_G + 2I_D) + 2m_W r^2 + I_W \\ m_{12} &= m_G \left(\frac{r^2}{4} - \frac{a^2 r^2}{4b^2} \right) - \frac{r^2}{4b^2} (I_G + 2I_D) \\ B &= m_G \frac{r^2}{2b} \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \\ Q_2 & Q_1 \end{bmatrix}; Q_{1,2} = m_G \frac{r}{4} \left(1 \pm \frac{a^2}{b^2} \right) \pm \frac{r}{4b} (I_G + 2I_D) \\ C &= m_G \frac{r}{2} \omega \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; G = m_G \frac{ar}{2b} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ở đây, m_G là khối lượng của phần cứng TWDMR, m_W là khối lượng của mỗi bánh xe, I_G là mô men quán tính của phần cứng TWDMR quanh trục thẳng đứng đi qua G , I_W , I_D lần lượt là mô men quán tính của mỗi bánh xe xung quanh trục quay và trục đường kính của nó.

2.2. Điều khiển trượt và mạng nơ ron RBF

Bài toán đặt ra là điều khiển TWDMR bám theo một quỹ đạo cho trước. Gọi điểm mục tiêu di chuyển của TWDMR là $T(x_T, y_T)$, sai số vị trí giữa điểm $M(x_M, y_M)$ và điểm mục tiêu $T(x_T, y_T)$ trong hệ tọa độ $MX'Y'$ được tính như sau:

$$e_p = \begin{bmatrix} e_{p1} \\ e_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T - x_M \\ y_T - y_M \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_T - x_M \\ y_T - y_M \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó, H là ma trận chuyển đổi:

$$H = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

Đạo hàm cấp một phương trình (4) theo thời gian ta có [15]:

$$\dot{e}_p = \begin{bmatrix} \dot{e}_{p1} \\ \dot{e}_{p2} \end{bmatrix} = h v + d_1 \quad (5)$$

$$h = \begin{bmatrix} \left(\frac{e_{p2}}{b} - 1 \right) \frac{r}{2} & - \left(\frac{e_{p2}}{b} + 1 \right) \frac{r}{2} \\ - \frac{e_{p1} r}{2b} & \frac{e_{p1} r}{2b} \end{bmatrix} \quad d_1 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L}{2b} \right) e_{p2} - \frac{\dot{\gamma}_R + \dot{\gamma}_L}{2} \\ - \left(\frac{\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L}{2b} \right) e_{p1} - \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \end{bmatrix}$$

Đặt các biến trạng thái $x_1 = e_p$; $x_2 = \dot{x}_1 + kx_1$ với k là một đại lượng vô hướng dương.

Đạo hàm cấp một và cấp hai của x_1 theo thời gian ta có:

$$\dot{x}_1 = \dot{e}_p = h\nu + d_1 \quad (6)$$

$$\ddot{x}_1 = h\dot{\nu} + \dot{h}\nu + \dot{d}_1 \quad (7)$$

Từ phương trình (3) nhân cả hai vế với M^{-1} ta được:

$$\dot{\nu} = -M^{-1}B\nu - M^{-1}(Q\ddot{y} + C\dot{\eta} + G\ddot{\eta} + \tau_d) + M^{-1}\tau = -M^{-1}B\nu + M^{-1}\tau + d_2 \quad (8)$$

Trong đó: $d_2 = -M^{-1}(Q\ddot{y} + C\dot{\eta} + G\ddot{\eta} + \tau_d)$.

Thay (8) vào (7) ta được:

$$\ddot{x}_1 = -hM^{-1}B\nu + hM^{-1}\tau + hd_2 + \dot{h}\nu + \dot{d}_1 \quad (9)$$

Đạo hàm cấp một của x_2 theo thời gian ta có:

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_1 + k\dot{x}_1 \quad (10)$$

Thay (6) và (9) vào (10) ta được:

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_1 + k\dot{x}_1 = -hM^{-1}B\nu + hM^{-1}\tau + hd_2 + \dot{h}\nu + \dot{d}_1 + kh\nu + kd_1 = P_1\nu + Q\tau + d_3 \quad (11)$$

trong đó: $P_1 = -hM^{-1}B$, $Q = hM^{-1}$, $d_3 = hd_2 + \dot{h}\nu + \dot{d}_1 + kh\nu + kd_1$

Từ phương trình (6), nhân cả hai vế với h^{-1} suy ra:

$$\nu = h^{-1}\dot{x}_1 - h^{-1}d_1 = h^{-1}(x_2 - kx_1) - h^{-1}d_1 = h^{-1}x_2 - h^{-1}kx_1 - h^{-1}d_1 \quad (12)$$

Thay (12) vào (11) ta được:

$$\dot{x}_2 = P_1h^{-1}x_2 - P_1h^{-1}kx_1 - P_1h^{-1}d_1 + Q\tau + d_3 = Px_2 - kPx_1 + Q\tau + d \quad (13)$$

trong đó: $P = P_1h^{-1}$, $d = d_3 - P_1h^{-1}d_1$ là thành phần nhiễu ngoài và trượt bánh xe bị giới hạn $d \leq D$.

Từ đó, ta có phương trình trạng thái mô tả hệ thống như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - kx_1 \\ \dot{x}_2 = Px_2 - kPx_1 + Q\tau + d \end{cases} \quad (14)$$

Định nghĩa mặt trượt là:

$$s = \dot{x}_1 + (n+k)x_1 \quad (15)$$

Với n là một đại lượng vô hướng thỏa mãn $(n+k) > 0$.

Đạo hàm cấp một của s theo thời gian ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{x}_1 + (n+k)\dot{x}_1 = \ddot{x}_1 + k\dot{x}_1 + n\dot{x}_1 = \dot{x}_2 + n\dot{x}_1 = n(x_2 - kx_1) + \dot{x}_2 \\ &= n(x_2 - kx_1) + Px_2 - kPx_1 + Q\tau + d \\ &= (nI + P)(x_2 - kx_1) + Q\tau + d = f(x) + Q\tau + d \end{aligned} \quad (16)$$

trong đó $f(x) = (nI + P)(x_2 - kx_1)$ là hàm số chưa biết, được xấp xỉ bằng mạng nơ ron RBF, I là ma trận đơn vị.

Chọn bộ điều khiển như sau:

$$\tau = -Q^{-1}[\hat{f}(x) + \rho \operatorname{sgn}(s)] \quad (17)$$

trong đó $\hat{f}(x)$ là xấp xỉ của $f(x)$ chính là đầu ra của mạng nơ ron RBF.

Mạng RBF được sử dụng để xấp xỉ $f(x)$ mô tả như Hình 2.

Cấu trúc mạng nơ ron RBF gồm 3 lớp:

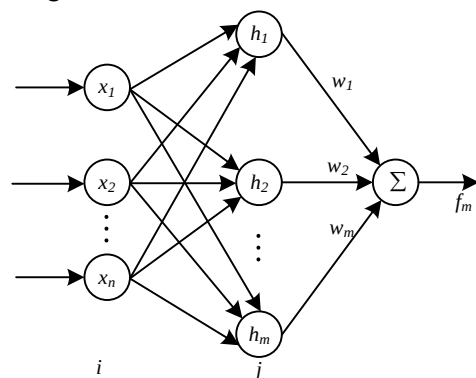
- Lớp thứ nhất là lớp đầu vào gồm các biến đầu vào $x_1, x_2, \dots, x_n$.

- Lớp thứ hai là lớp ẩn, đầu ra của lớp ẩn được tính theo công thức sau:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{b_j^2}\right) \quad (18)$$

- Lớp thứ ba là lớp đầu ra, giá trị đầu ra của mạng nơ ron được tính như sau:

$$f(x) = W^T h(x) + \varepsilon \quad (19)$$



Hình 2. Cấu trúc mạng nơ ron RBF

trong đó x là trạng thái đầu vào của mạng, $h = [h_j]^T$ là hàm Gaussian, m là số nơ ron lớp ẩn, c_i là tâm của hàm Gaussian, b_j là chiều rộng của hàm Gaussian, $\varepsilon \leq \varepsilon_N$ là sai số xấp xỉ của mạng nơ ron, $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ là vector trọng số lý tưởng của mạng nơ ron RBF.

Đầu vào của mạng nơ ron được chọn là $x = [x_1 \ x_2]^T$ và đầu ra của mạng nơ ron là:

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T h(x) \quad (20)$$

Thay (17) vào (16), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= f(x) + Q(-Q^{-1})[\hat{f}(x) + \rho \operatorname{sgn}(s)] + d = f(x) - \hat{f}(x) - \rho \operatorname{sgn}(s) + d \\ &= \tilde{f}(x) - \rho \operatorname{sgn}(s) + d \end{aligned} \quad (21)$$

trong đó

$$\tilde{f}(x) = f(x) - \hat{f}(x) = W^T h(x) + \varepsilon - \hat{W}^T h(x) = \tilde{W}^T h(x) + \varepsilon \quad (22)$$

và $\tilde{W} = W - \hat{W}$.

2.3. Chứng minh tính ổn định

Chọn hàm Lyapunov có dạng như sau [18]:

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\beta \tilde{W}^T \tilde{W} \quad (23)$$

trong đó $\beta > 0$.

Đạo hàm cấp một của V_1 theo thời gian ta có:

$$\dot{V} = s\dot{s} + \beta \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \quad (24)$$

Thay (21) vào (24), ta được:

$$\dot{V} = s(\tilde{f}(x) - \rho \operatorname{sgn}(s) + d) - \beta \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \quad (25)$$

Thay tiếp (22) vào (25) suy ra:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(\tilde{W}^T h(x) + \varepsilon - \rho \operatorname{sgn}(s) + d) - \beta \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} \\ &= \tilde{W}^T (sh(x) - \beta \dot{\tilde{W}}) + s(\varepsilon - \rho \operatorname{sgn}(s) + d) \end{aligned} \quad (26)$$

Luật cập nhật thích nghi của mạng RBF được chọn như sau:

$$\dot{\tilde{W}} = \frac{1}{\beta} sh(x) \quad (27)$$

Khi đó, ta có:

$$\dot{V} = s(\varepsilon - \rho \operatorname{sgn}(s) + d) = s(\varepsilon + d) - \rho|s| \quad (28)$$

Do sai số xấp xỉ của mạng nơ ron ε bị giới hạn và đủ nhỏ nên thiết kế $\rho \geq \varepsilon_N + D + \rho_0$, $\rho_0 > 0$. Khi đó, ta có được xấp xỉ $\dot{V} \leq -\rho_0|s| \leq 0$. Điều này có nghĩa là bằng cách sử dụng bộ điều khiển (17) và luật thích nghi (27), hệ thống (14) sẽ ổn định khi $t \rightarrow \infty$.

3. Kết quả mô phỏng

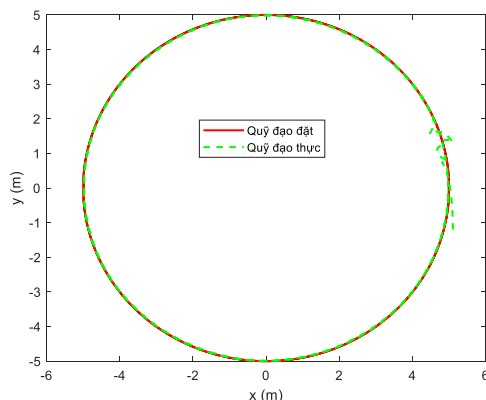
Trong phần này, hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất được xác thực trên hệ thống TWDMR với các thông số được minh họa như trong Bảng 1 [15].

Bảng 1. Các thông số của WMR

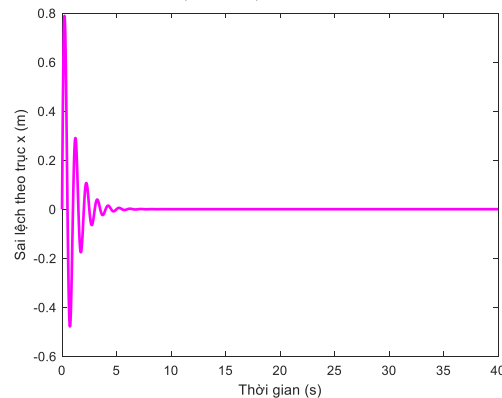
Tên biến	Ý nghĩa	Giá trị
m_G	Khối lượng phần cứng	10 (kg)
m_W	Khối lượng mỗi bánh xe	2 (kg)
I_G	Mô men quán tính của phần cứng WMR quanh trục thẳng đứng đi qua G	4 (kgm ²)
I_W	Mô men quán tính của mỗi bánh xe xung quanh trục bánh xe	0,1 (kgm ²)
I_D	Mô men quán tính của mỗi bánh xe quanh trục thẳng đứng đi qua tâm bánh xe	0,05 (kgm ²)
a	Khoảng cách giữa điểm M và điểm G	0,2 (m)
b	Một nửa khoảng cách giữa hai bánh xe sau	0,3 (m)
r	Bán kính của mỗi bánh xe	0,15 (m)

Mô phỏng được thực hiện trong các điều kiện mà các tham số hệ thống không chắc chắn (tăng 30% so với giá trị định mức), bánh xe trượt $[\dot{\gamma}_R \ \dot{\gamma}_L \ \dot{\eta}]^T = [1 + \sin t \ 1 + \cos t \ \sin t]^T$ (m/s) và nhiễu đầu vào $\tau_d = [1 + \sin(0,4t) \ 1 + \cos(0,3t)]^T$ (N.m). Các thông số điều khiển được thiết kế như sau: $k = 8,3$, $n = 1,7$, $\rho = 10$. Cấu trúc của mạng nơ ron RBF được chọn có 2 lớp đầu vào, 5 lớp ẩn và 1 lớp đầu ra; trong đó $c_i = [-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2]$, $b_j = 5$ và tham số thích nghi $\beta = 0,01$. Giá trị khởi tạo cho mỗi phần tử trọng số mạng nơ ron RBF là 0,1.

Trường hợp 1: Quỹ đạo hình tròn có phương trình
$$\begin{cases} x_r = 5\cos(0,1\pi t) \\ y_r = 5\sin(0,1\pi t) \end{cases}$$

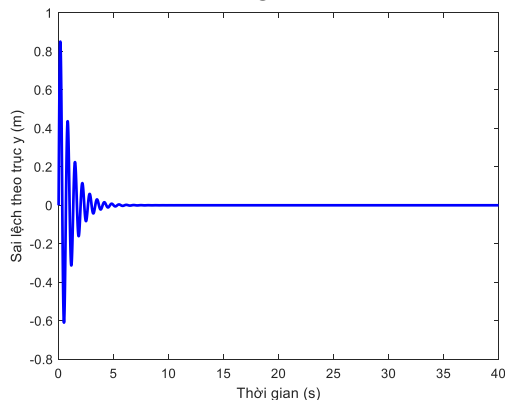


Hình 3. Robot bám quỹ đạo hình tròn

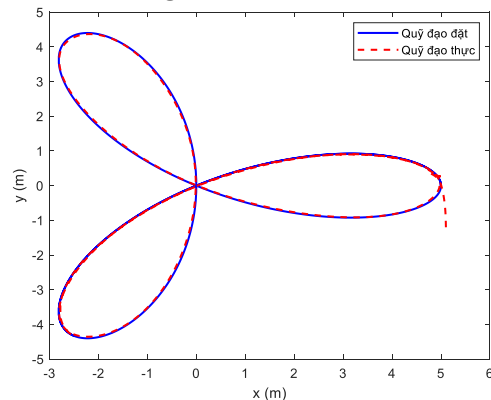


Hình 4. Sai số bám trục x quỹ đạo hình tròn

Trong Hình 3, vị trí ban đầu của TWDMMR không nằm trên quỹ đạo đặt (đường tròn nét liền màu đỏ). Thông qua bộ điều khiển được đề xuất, TWDMMR có xu hướng dao động xung quanh đường cong mục tiêu sau đó nhanh chóng bám quỹ đạo đặt thể hiện trên quỹ đạo thực tế (đường tròn nét đứt màu xanh lá). Hình 4 và 5 cho thấy rằng trong giai đoạn đầu (0-5 giây), sai số bám dao động mạnh do TWDMMR nằm ngoài quỹ đạo mong muốn. Sau giai đoạn dao động này, sai số giảm dần và trở nên ổn định. Đến khoảng 10 giây, sai số duy trì gần bằng 0, cho thấy robot đã đạt được độ chính xác trong điều khiển và ổn định trạng thái hoạt động.



Hình 5. Sai số bám trục y quỹ đạo hình tròn



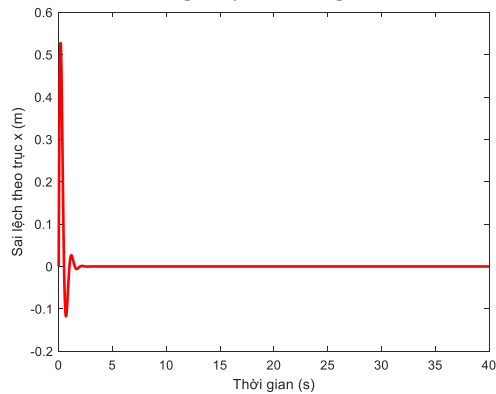
Hình 6. Robot bám quỹ đạo hình ba lá

Trường hợp 2: Quỹ đạo hình ba lá có phương trình

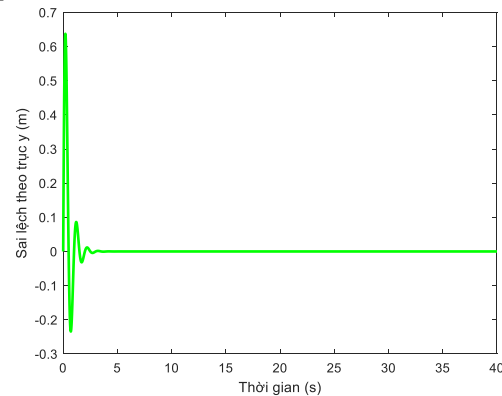
$$\begin{cases} x_r = 5\cos(0,1\pi t)\cos(\pi t/30) \\ y_r = 5\cos(0,1\pi t)\sin(\pi t/30) \end{cases}$$

Trong Hình 6, chúng ta có thể thấy rằng TWDMMR tiếp cận mục tiêu một cách trơn tru và hiệu quả, cho thấy khả năng điều khiển tốt và ổn định của bộ điều khiển đề xuất. Khi robot di chuyển, nó không chỉ duy trì được tốc độ ổn định mà còn nhanh chóng bám theo quỹ đạo mong muốn. Kết quả này được thể hiện rõ trong Hình 7 và Hình 8, đây là sai số bám theo cả hai trục x và y của robot. Các hình vẽ này cho phép chúng ta theo dõi cách thức robot điều chỉnh hướng di chuyển

của nó để giảm thiểu sai số. Sau khoảng 4 giây, sai số bám theo cả hai trục này giảm xuống gần bằng không, cho thấy rằng robot đã đạt được độ chính xác rất cao trong việc bám quỹ đạo mong muốn. Điều này không chỉ xác nhận hiệu suất của hệ thống điều khiển mà còn cho thấy rằng robot có khả năng duy trì trạng thái ổn định trong quá trình thực hiện nhiệm vụ.



Hình 7. Sai số bám trục x quỹ đạo hình ba lá



Hình 8. Sai số bám trục y quỹ đạo hình ba lá

4. Kết luận

Bộ điều khiển thích nghi bền vững đã được phát triển với mục tiêu nâng cao hiệu quả điều khiển cho hệ thống TWDMR. Lựa chọn nền tảng điều khiển trượt kết hợp với mạng nơ ron RBF cho phép bộ điều khiển có khả năng điều chỉnh linh hoạt và thích nghi với những thay đổi trong môi trường làm việc. Một trong những thách thức chính trong việc điều khiển TWDMR là khả năng duy trì độ chính xác và ổn định trong những điều kiện không thuận lợi. Thêm vào đó, các yếu tố như nhiễu từ môi trường xung quanh, hiện tượng trượt bánh xe và những bất định đáng kể trong mô hình có thể ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống. Nhờ vào thiết kế thích nghi, bộ điều khiển đã thể hiện khả năng điều khiển tốt, giúp duy trì độ chính xác cao ngay cả trong bối cảnh nhiễu biến đổi và phức tạp. Bên cạnh đó, tính ổn định của bộ điều khiển đã được chứng minh trên toàn bộ vùng làm việc thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov, đây là một phương pháp nổi bật trong lý thuyết điều khiển giúp khẳng định rằng các phản ứng đầu ra của hệ thống sẽ luôn ổn định và đáng tin cậy. Điều này mang lại độ tin cậy cho việc ứng dụng bộ điều khiển trong các tình huống thực tế, nơi mà sự không chắc chắn thường xuyên xuất hiện. Để kiểm tra hiệu quả và tính khả thi của bộ điều khiển, chúng tôi đã thực hiện các mô phỏng trên phần mềm Matlab - Simulink. Kết quả từ các mô phỏng cho thấy bộ điều khiển hoạt động hiệu quả trong việc điều chỉnh và xử lý các tình huống phức tạp, đồng thời duy trì hiệu suất tốt. Những kết quả này hứa hẹn cho việc áp dụng vào các thực nghiệm trên robot thực tế trong tương lai. Sau khi đã xác thực trên môi trường mô phỏng, bước tiếp theo sẽ là tiến hành thử nghiệm trong môi trường thực tế để đánh giá hiệu quả hoạt động của bộ điều khiển trong những điều kiện không ngừng thay đổi và phát triển. Chúng tôi hy vọng rằng những nghiên cứu tiếp theo sẽ mở ra cơ hội mới cho việc ứng dụng bộ điều khiển này trong các lĩnh vực khác nhau liên quan đến robot di động.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. G. Tzafestas, *Introduction to mobile robot control*, First edition. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [2] H. Yu, N. Sheng, and Z. Ai, "Sliding mode control for trajectory tracking of mobile robots," *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, Shanghai, China, 2021, pp. 13-17.
- [3] Y. Cao and J. Pu, "A Novel Zeroing Neural Network Control Scheme for Tracked Mobile Robot Based on an Extended State Observer," *Applied Sciences*, vol.14, no.1, 2023, Art. no. 303.
- [4] C. Lei, G. Li, and Z. Yang, "Backstepping Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Mobile Robot: An Experimental and Comparative Study," *2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, vol.7, pp.700-706, 2024.

-
- [5] S. R. Dekhterman, W. R. Norris, D. Nottage, and A. Soylemezoglu, "Hierarchical Rule-Base Reduction Fuzzy Control for Path Tracking Variable Linear Speed Differential Steer Vehicles," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 828-841, 2025.
 - [6] N. K. Goswami and P. K. Padhy, "Sliding mode controller design for trajectory tracking of a non-holonomic mobile robot with disturbance," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 72, pp. 307-323, 2018.
 - [7] S. Peng and W. Shi, "Adaptive fuzzy output feedback control of a nonholonomic wheeled mobile robot," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43414- 43424, 2018.
 - [8] D. Huang, J. Zhai, W. Ai, and S. Fei, "Disturbance observer-based robust control for trajectory tracking of wheeled mobile robots," *Neurocomputing*, vol. 198, pp. 74-79, 2016.
 - [9] L. Li, T. Wang, Y. Xia, and N. Zhou, "Trajectory tracking control for wheeled mobile robots based on nonlinear disturbance observer with extended Kalman filter," *J. Franklin Inst.*, vol. 357, no. 13, pp. 8491-8507, 2020.
 - [10] T. T. L. Vu, "Research and design controller for mobile robot on the basis of sliding mode control method," (in Vietnamese), *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 8, pp. 95–102, Apr. 2022.
 - [11] T. T. T. Tran, "Proportional integral derivative sliding mode control for an omni-directional mobile robot," (in Vietnamese), *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 227, no. 8, pp. 123–130, Apr. 2022.
 - [12] T. H. Nguyen, T. H. Vo, Q. L. Vo, and H. H. Bui, "Design and development of traction tracking control for mobile robots based on neural networks subject to uncertainty parameters and disturbances," (in Vietnamese), *HUIH Journal*, vol. 2024, 2024, Art. no. 286, doi: 10.57001/huih5804.2024.286.
 - [13] Y. Jiang, L. C. Boon, and W. Danwei, "Integrated Estimation for Wheeled Mobile Robot posture, velocities, and wheel skidding perturbations," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2355–2360.
 - [14] G. Baffet, A. Charara, and J. Stephant, "Sideslip angle, lateral force and road friction estimation in simulations and experiments," *Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications*, 2006, pp. 903-908.
 - [15] T. Nguyen and L. Le, "Neural network-based adaptive tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot with unknown wheel slips, model uncertainties, and unknown bounded disturbances," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 378-392, 2018.
 - [16] V. Q. Ha, S. T. H. Pham, and N. T.-T. Vu, "Adaptive fuzzy type-2 controller for wheeled mobile robot with disturbances and wheel slips," *Journal of Robotics*, vol. 2021, pp. 1-11, September 2021.
 - [17] Y. Jinhua, Y. Suzhen, and J. Xiao, "Trajectory tracking control of WMR based on sliding mode disturbance observer with unknown skidding and slipping," *IEEE 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control*, 2017, pp. 18-22.
 - [18] J. Liu, *Intelligent control design and MATLAB simulation*, Springer Singapore, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-5263-7.