

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MẶT TRƯỢT ĐỘNG KẾT HỢP MẠNG NƠN ĐIỀU KHIỂN BẨM QUỸ ĐẠO CHO ROBOT TỰ HÀNH BÁNH XE MECANUM

TRAJECTORY TRACKING CONTROL FOR THE MECANUM WHEEL MOBILE ROBOT
BY THE DYNAMIC SURFACE CONTROLLER CONNECTED TO THE NEURAL NETWORK

Nguyễn Thị Thành^{1,*}, Võ Thu Hà¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.288>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo chuyển động của robot tự hành bốn bánh bánh xe Mecanum (MWMMR) sử dụng bộ điều khiển mặt trượt động (DSC) kết hợp mạng nơon (NN) khi xét đến các nhiễu ngoại tác động. Trong bài báo, chúng tôi xây dựng mô hình toán học của MWMMR bao gồm mô hình động học, động lực học có xét đến nhiễu bất định. Từ đó thiết kế bộ điều khiển DSC kết hợp mạng NN để xấp xỉ thành phần nhiễu bất định của mô hình MWMMR. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh theo tiêu chuẩn Lyapunov.

Từ khóa: Robot tự hành bánh xe mecanum; bộ điều khiển trượt động; mạng nơon.

ABSTRACT

This article presents the design of a motion tracking controller for the Mecanum wheeled autonomous robot (MWMMR) using a sliding surface controller (DSC) connected to a unified neural network (NN) when checking for disturbances. In the article, we build a mathematical model of MWMMR including a kinematic and dynamic model that considers uncertain noise. From there, the control DSC fusion network is designed so that the NN increases its speed despite the component noise of the MWMMR model. The stability of the system is proven according to the Lyapunov criterion.

Keywords: Dynamic Surface Control; Neural Network; trajectory tracking control.

¹Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: ntthanh.ddt@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
v_{Ri}	m/s	Vận tốc các bánh xe mecanum
v_{Li}	m/s	Vận tốc các con lăn bị động của bánh xe
r	m	Bán kính bánh xe mecanum
L	m	Khoảng cách hai hàng bánh xe hai bên
d	m	Khoảng cách hai hàng bánh xe trước và sau

CHỮ VIẾT TẮT

RTH	Robot tự hành
MWMMR	Robot tự hành bánh xe mecanum (Mecanum wheel mobile robot)
DSC	Bộ điều khiển mặt trượt động (Dynamic Surface Control)
NN	Mạng nơon (Neural Network)
BĐK	Bộ điều khiển

1. GIỚI THIỆU

RTH ngày càng được áp dụng rộng rãi ở các lĩnh vực sản xuất hiện đại và thông minh. Các lĩnh vực ứng dụng của RTH đó là: nông nghiệp [1, 2], công nghiệp vận chuyển sản xuất [3-6], công nghiệp khai khoáng [7], thám hiểm trong vũ trụ [8], y tế, giáo dục [11, 12] và nhiều lĩnh vực khác. Robot MWMMR là RTH sử dụng bốn bánh xe đa hướng Mecanum, nó có khả năng di chuyển linh hoạt trong không gian làm việc, do đó MWMMR được

sử dụng trong môi trường làm việc có không gian chật hẹp không đủ để thiết kế quay đầu cho robot [13, 14] do cấu tạo đặc biệt của bánh xe mecamum. Tuy nhiên, MWMMR có nhược điểm có hiện tượng trượt bánh xe và quay tự lựa của các con lăn bị động trên bánh xe dẫn đến điều khiển MWMMR khó chính xác. Do đó, gần đây các nghiên cứu thiết kế các BDK để nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo, đây là hướng nghiên cứu đang được các nhà nghiên cứu quan tâm. Trong [15] thiết kế BDK dự báo mô hình cho robot tự hành 4 bánh xe mecamum có ràng buộc dưới tác động của nhiễu ngẫu nhiên; [16-18] thiết kế BDK PID với tham số thay đổi để điều khiển RTH di chuyển bằng bánh xe với vận tốc thay đổi; Pankaj Singh Yadav và cộng sự [19] đã thiết kế BDK trượt điều khiển vận tốc cho robot bốn bánh mecamum khi xét đến nhiễu và các yếu tố bất định; luật điều khiển thích nghi cho MWMMR bám quỹ đạo dưới tác động của trượt bánh xe được đề xuất trong [20] với tính ổn định được đảm bảo thông qua tiêu chuẩn Lyapunov; [21] đã sử dụng BDK phản hồi trạng thái tuyến tính điều khiển bám quỹ đạo; [22] sử dụng các luật mờ để xác định các tham số của BDK PI truyền thống dưới ảnh hưởng của trượt bánh xe trong khi chuyển động. Một số công trình đã sử dụng BDK trượt, nhưng phương pháp này nhược điểm là xảy ra hiện tượng rung "chattering" và ảnh hưởng khi có nhiễu khiến hệ thống mất ổn định [23]. Để khắc phục hiện tượng đó, nghiên cứu [24] đã đề xuất BDK DSC để điều khiển robot tự hành bánh xe Mecamum bám quỹ đạo khắc phục được hiện tượng "chattering". Tuy nhiên, mô hình MWMMR trong [24] chưa xét đến thành phần bất định và nhiễu. Do đó, bài báo này nghiên cứu BDK DSC kết hợp mạng NN để xấp xỉ các thành phần bất định. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh theo tiêu chuẩn Lyapunov. Cấu trúc bài báo được trình bày như sau: Đầu tiên là mô hình toán học của MWMMR gồm mô hình động học và động lực học của robot được thiết lập. Thứ hai là thiết kế BDK DSC kết hợp mạng NN và chứng minh tính ổn định của BDK theo Lyapunov. Thứ ba, trình bày các kết quả mô phỏng và thảo luận. Cuối cùng là các kết luận xác minh các kết quả nghiên cứu của bài báo.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA MWMMR

2.1. Mô hình động học

Xét MWMMR được mô tả trên hình 1. Theo tài liệu [1, 2] phương trình động học của MWMMR được cho bởi:

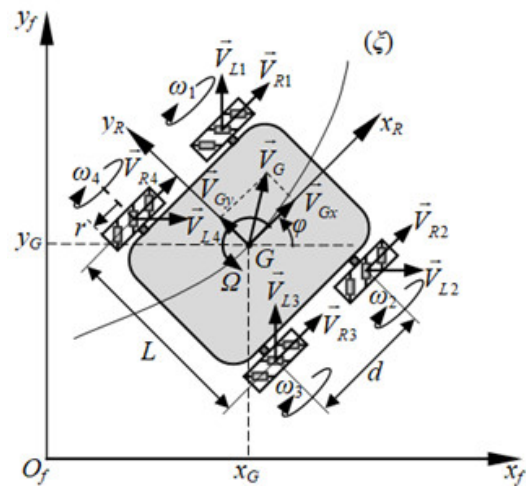
$$\omega = JR^T \dot{q}_f \tag{1}$$

Trong đó:

$$J = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L+d)/2 \\ 1 & 1 & (L+d)/2 \\ 1 & -1 & (L+d)/2 \\ 1 & 1 & -(L+d)/2 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\omega = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]^T;$$

$\dot{q}_f = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\varphi}]^T = [V_{Gx} \quad V_{Gy} \quad \Omega]^T$ với Ω là vận tốc góc của MWMMR; q_f là véc tơ vị trí tại tâm hình học G của robot MWMMR trong hệ quy chiếu \mathcal{F}_f .



Hình 1. Mối quan hệ vận tốc giữa bánh xe và MWMMR

2.2. Mô hình động lực học

Theo tài liệu [25] phương trình động lực học của MWMMR được cho bởi:

$$E\tau = [MJ(\dot{R}^T \dot{q} + R^T \ddot{q}) - Hf_{Lms} - Kf_{ms} + \tau_d] \tag{2}$$

Trong đó:

$$M = \begin{bmatrix} A+B+J_{Ob} & -B & A-B & B \\ -B & A+B+J_{Ob} & B & A-B \\ A-B & B & A+B+J_{Ob} & -B \\ B & A-B & -B & A+B+J_{Ob} \end{bmatrix}$$

với $A = \frac{Mr^2}{8}; B = \frac{Jr^2}{4(L+d)}$; $M = m_b + 4m_w$ là khối lượng

của robot MWMMR; m_b và m_w lần lượt là khối lượng của thân MWMMR và bánh xe mecamum; $J = J_{Gb} + m_w(L^2 + d^2) + J_{Gw}$ là mô men quán tính của MWMMR.

$$E = \begin{bmatrix} 1-a & a & -b & b \\ a & 1-a & b & -b \\ -b & b & 1-a & a \\ b & -b & a & 1-a \end{bmatrix}$$

với $a = \frac{r(L+2d)}{4\sqrt{2}r_{OL}(L+d)}$; $b = \frac{rL}{4\sqrt{2}r_{OL}(L+d)}$; r_{OL} là khoảng cách từ trục con lăn đến trục bánh xe.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{r(L+2d)}{4(L+d)} & \frac{r(L+2d)}{4(L+d)} & -\frac{rL}{4(L+d)} & \frac{rL}{4(L+d)} \\ \frac{r(L+2d)}{4(L+d)} & -\frac{r(L+2d)}{4(L+d)} & \frac{rL}{4(L+d)} & -\frac{rL}{4(L+d)} \\ -\frac{rL}{4(L+d)} & \frac{rL}{4(L+d)} & -\frac{r(L+2d)}{4(L+d)} & \frac{r(L+2d)}{4(L+d)} \\ \frac{rL}{4(L+d)} & -\frac{rL}{4(L+d)} & \frac{r(L+2d)}{4(L+d)} & -\frac{r(L+2d)}{4(L+d)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \text{diag}[-r \quad -r \quad -r \quad -r]$$

$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4]^T$ là momen điều khiển các bánh xe;

$\boldsymbol{\tau}_d$ là thành phần nhiễu ngoại;

$\mathbf{f}_{Lms} = [F_{Lms1} \quad F_{Lms2} \quad F_{Lms3} \quad F_{Lms4}]^T$ là lực ma sát lăn của con lăn trên các bánh xe;

$\mathbf{f}_{ms} = [F_{ms1} \quad F_{ms2} \quad F_{ms3} \quad F_{ms4}]^T$ là lực ma sát lăn của các bánh xe;

Với $F_{msi} = N_i \mu_i \text{sgn} \omega_i$ và $F_{Lmsi} = N_i \mu_i \text{sgn} \omega_{Li}$ lần lượt là thành phần ma sát tại điểm tiếp xúc con lăn giữa bánh xe với mặt đường; N_i, μ_i lần lượt là phản lực từ mặt sàn tác dụng lên các bánh xe và hệ số ma sát lăn.

Từ (1) và (2) suy ra:

$$\mathbf{E}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{MJR}^T \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{MJ}\dot{\mathbf{R}}^T \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G} \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_d \quad (3)$$

Với: $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\phi}]^T = [V_{Gx} \quad V_{Gy} \quad \Omega]^T$ là vận tốc của robot; $\mathbf{G} = (\mathbf{H} - \mathbf{K})\mathbf{J}\mathbf{R}^T \mathbf{N}\boldsymbol{\mu}$

3. THIẾT KẾ BDK

3.1. Thiết kế BDK DSC

Đặt biến trạng thái của hệ thống:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 = \mathbf{q} = [x \quad y \quad \phi]^T \\ \mathbf{x}_2 = \mathbf{v}_R = [V_{Gx} \quad V_{Gy} \quad \Omega]^T \end{cases} \quad (4)$$

Từ phương trình (1) đến (4) ta có phương trình trạng thái của MWMMR:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{R}\mathbf{x}_2 \\ \mathbf{MJ}\dot{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{G} \text{sgn}(\mathbf{x}_2) + \boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{E}\boldsymbol{\tau} \end{cases} \quad (5)$$

Do $\boldsymbol{\tau}_d$ không đo được chính xác nên không xét trong tính toán BDK DSC.

Véc tơ sai lệch bám $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d}$ với $\mathbf{x}_{1d} = \mathbf{q}_d = [x_d \quad y_d \quad \phi_d]^T$ là quỹ đạo đặt. Đạo hàm \mathbf{e}_1 :

$$\dot{\mathbf{e}}_1 = \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{1d} = \mathbf{R}\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{1d} \quad (6)$$

Gọi $\boldsymbol{\alpha}_f$ là tín hiệu điều khiển ảo. $\boldsymbol{\beta}$ là đầu vào của bộ lọc thông thấp bậc nhất và được xác định:

$$\boldsymbol{\beta} = -\mathbf{R}^T (\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{1d}) \quad (7)$$

$$\text{Với } \mathbf{c}_1 = \begin{bmatrix} c_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & c_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & c_{1\phi} \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\beta}$ đưa qua bộ lọc thông thấp bậc nhất để tính toán giá trị đạo hàm cho tín hiệu điều khiển ảo:

$$\mathbf{T}\dot{\boldsymbol{\alpha}}_f + \boldsymbol{\alpha}_f = \boldsymbol{\beta} \quad (8)$$

Với T được chọn đủ nhỏ để tăng tốc độ hội tụ.

$$\boldsymbol{\alpha}_f(s) = \frac{\boldsymbol{\beta}(s)}{Ts+1}; \dot{\boldsymbol{\alpha}}_f = \frac{\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\alpha}_f}{T} \quad (9)$$

Chọn hàm Lyapunov: $V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1$ (10)

Đạo hàm của V_1 ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{e}_1^T \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_1^T (\mathbf{R}\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{1d}) \\ &= -\mathbf{e}_1^T \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T (\mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{R}\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{1d}) \end{aligned} \quad (11)$$

Với $\mathbf{x}_2 = \boldsymbol{\alpha}$ thì $\dot{V}_1 = -\mathbf{e}_1^T \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \dot{\mathbf{c}}_1 (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_1) = -\mathbf{e}_1^T \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1$

Từ (8) và (11) suy ra $\dot{V}_1 = -\mathbf{e}_1^T \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 \leq 0$

Gọi \mathbf{e}_2 là sai lệch tín hiệu điều khiển ảo và được xác định bởi:

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \boldsymbol{\alpha}_f \quad (12)$$

Chọn mặt trượt:

$$\mathbf{S} = \lambda \mathbf{e}_1 + \mathbf{R}\mathbf{e}_2 \quad (13)$$

Với $\lambda > 0$ là hệ số của mặt trượt.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{S}} &= \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{e}_2 + \mathbf{R}\dot{\mathbf{e}}_2 = \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{e}_2 + \mathbf{R}(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_f) \\ \dot{\mathbf{S}} &= \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{e}_2 + \mathbf{R}[\mathbf{J}^* \mathbf{M}^{-1} (-\mathbf{G} \text{sgn}(\mathbf{x}_2) + \mathbf{E}\boldsymbol{\tau}) - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_f] \end{aligned} \quad (14)$$

Chọn hàm Lyapunov:

$$V_2 = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S}$$

Tín hiệu điều khiển của hệ thống: $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{sw}$ (15)

Với $\boldsymbol{\tau}_{eq}$ là tín hiệu điều khiển giữ trạng thái của hệ thống nằm trên mặt trượt tìm được khi $\dot{\mathbf{S}} = 0$; $\boldsymbol{\tau}_{eq}$ được xác định như sau:

$$\boldsymbol{\tau}_{eq} = \mathbf{E}^{-1} [\mathbf{MJ}(-\mathbf{R}^T \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 - \mathbf{R}^T \dot{\mathbf{R}}\mathbf{e}_2 + \dot{\mathbf{x}}_{2d}) - \mathbf{G} \text{sgn}(\mathbf{x}_2)] \quad (16)$$

τ_{sw} là tín hiệu điều khiển được sử dụng để đưa trạng thái của hệ thống tiến về mặt trượt và được xác định:

$$\tau_{sw} = -E^{-1}MJ(c_2 \operatorname{sgn}(S) + c_3 S) \quad (17)$$

Với $c_2 = \begin{bmatrix} c_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & c_{2y} & 0 \\ 0 & 0 & c_{2\varphi} \end{bmatrix}$; $c_3 = \begin{bmatrix} c_{3x} & 0 & 0 \\ 0 & c_{3y} & 0 \\ 0 & 0 & c_{3\varphi} \end{bmatrix}$ là ma

trận đường chéo xác định dương.

Đạo hàm hàm Lyapunov V_2 (15):

$$\dot{V}_2 = S^T \dot{S} = S^T \{ \lambda \dot{e}_1 + \dot{R}e_2 + R[J^+ M^{-1}(-G \operatorname{sgn}(x_2) + E\tau) - \dot{\alpha}_f] \}$$

Với tín hiệu điều khiển (16) và (12) thì $\dot{x}_{2d} = \dot{\alpha}_f$, V_2 được xác định:

$$\dot{V}_2 = -S^T c_2 \operatorname{sgn}(S) - S^T c_3 S \quad (18)$$

Với c_2 và c_3 là các hệ số, do đó:

$$\dot{V}_2 = -S^T c_2 \operatorname{sgn}(S) - S^T c_3 S \leq 0 \quad (19)$$

Điều này thoả mãn tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.

3.2. Sử dụng mạng nơ ron để xấp xỉ thành phần nhiễu và bất định mô hình MWMMR

Mô hình robot MWMMR có chứa nhiều các thành phần nhiễu và bất định được biểu diễn trong τ_d ở phương trình động lực học. Do đó, tín hiệu điều khiển của BDK DSC khó thực hiện điều khiển MWMMR khi có xét đến τ_d . Để giảm thiểu tác động của các thành phần nhiễu và bất định này, một mạng NN được đề xuất.

Gọi Ψ là các thành phần nhiễu và bất định được xác định như sau:

$$\Psi = J^+ M^{-1}(Hf_{Lms} + Kf_{ms} + \tau_d) \quad (20)$$

Đặt biến trạng thái của hệ thống:

$$\begin{cases} x_1 = q = [x \ y \ \varphi]^T \\ x_2 = v_R = [V_{Gx} \ V_{Gy} \ \Omega]^T \end{cases} \quad (21)$$

Hệ phương trình trạng thái của MWMMR:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = R x_2 \\ \dot{x}_2 = \Psi + J^+ M^{-1} E \tau \end{cases} \quad (22)$$

Véc tơ sai lệch bám: $e_1 = x_1 - x_{1d}$; véc tơ sai lệch vận tốc: $e_2 = x_2 - x_{2d}$

Chọn mặt trượt: $S = \lambda e_1 + R e_2$ (23)

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \lambda \dot{e}_1 + \dot{R} e_2 + R \dot{e}_2 \\ &= \lambda \dot{e}_1 + \dot{R} e_2 + R(\Psi + J^+ M^{-1} E \tau - \dot{x}_{2d}) \end{aligned} \quad (24)$$

Tín hiệu điều khiển của hệ:

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{sw} \quad (25)$$

Với:

$$\tau_{eq} = -E^{-1}MJ[R^T(\lambda \dot{e}_1 + \dot{R}e_2) - \dot{x}_{2d} + \hat{\Psi}] \quad (26)$$

$$\tau_{sw} = -E^{-1}MJ(c_2 \operatorname{sgn}(S) + c_3 S) \quad (27)$$

Trong đó, $\hat{\Psi} = [\hat{\Psi}_x \ \hat{\Psi}_y \ \hat{\Psi}_\varphi]$ là vector đầu ra của NN

Ma trận trọng số được \mathfrak{R} có kích thước $(n \times 3)$ với n là số nhân NN. $\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_n]^T$ là vector chứa giá trị đầu ra của các nhân NN

Luật thích nghi cho $\hat{\Psi}$:

$$\dot{\Psi} = \mathfrak{R}^T \gamma + \varepsilon \quad (28)$$

$$\hat{\Psi} = \mathfrak{R}^T \gamma \quad (29)$$

Trong đó: Ψ là giá trị lý tưởng của thành phần bất định; $\hat{\Psi}$ là giá trị đầu ra của NN.

Ma trận sai lệch trọng số: $\tilde{\mathfrak{R}} = \mathfrak{R} - \hat{\mathfrak{R}}$ trong đó: \mathfrak{R} là các giá trị trọng số lý tưởng và $\hat{\mathfrak{R}}$ là trọng số tính toán của NN. γ được xác định bởi hàm bán kính xuyên tâm:

$$\gamma_i = \exp\left(-\frac{\|x_1 - \rho_{1i}\|^2 + \|x_2 - \rho_{2i}\|^2}{\sigma_i^2}\right) \quad (30)$$

Với:

x_1 và x_2 lần lượt là các vector đầu vào của NN.

ρ_{1i} và ρ_{2i} là các vectơ tâm của nhân NN.

σ_i đặc trưng cho độ lệch chuẩn của hàm.

Từ đó, luật cập nhật của NN:

$$\dot{\hat{\Psi}} = \Xi(\gamma S^T R - \mu \|\mathfrak{S}\| \hat{\mathfrak{R}}) \quad (31)$$

Trong đó:

Ξ là ma trận vuông đường chéo xác định dương cấp n ;

μ là tốc độ học của NN.

S thoả mãn điều kiện sau:

$$\|\mathfrak{S}\| \geq \frac{\varepsilon_N + \mu \frac{\|\mathfrak{R}\|_F^2}{4}}{c_{3\min}} \quad (32)$$

Xét hàm Lyapunov:

$$V_3 = \frac{1}{2} S^T S + \frac{1}{2} \operatorname{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathfrak{R}}) \quad (33)$$

Đạo hàm V_3 :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} + \text{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathfrak{R}}}) \\ &= \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} + \text{tr} \left[\tilde{\mathfrak{R}}^T \Gamma^{-1} (\dot{\mathfrak{R}} - \dot{\tilde{\mathfrak{R}}}) \right] \quad (\dot{\mathfrak{R}} = 0) \\ &= \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} - \text{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathfrak{R}}}) \end{aligned} \quad (34)$$

Từ (34), (25), (26), (27), đạo hàm V_3 :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} \\ &\quad + \mathbf{S}^T \mathbf{R}(\Psi - \hat{\Psi}) - \text{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathfrak{R}}}) \end{aligned} \quad (35)$$

Đạo hàm V_3 sử dụng (24), (25) và (27) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \epsilon \\ &\quad + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \tilde{\Psi}^T \gamma - \text{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathfrak{R}}}) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \epsilon \\ &\quad + \text{tr}(-\tilde{\mathfrak{R}}^T (\Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathfrak{R}}} - \gamma \mathbf{S}^T \mathbf{R} \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1})) \\ &= -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \epsilon \\ &\quad + \text{tr} \left(-\tilde{\mathfrak{R}}^T \left(\Gamma^{-1} \left(\Gamma (\gamma \mathbf{S}^T \mathbf{R} - \mu \|\mathbf{S}\| \tilde{\mathfrak{R}}) \right) - \gamma \mathbf{S}^T \mathbf{R} \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1} \right) \right) \\ &= -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \epsilon \\ &\quad + \text{tr} \left(-\tilde{\mathfrak{R}}^T \left(\left(\gamma \mathbf{S}^T \mathbf{R} - \mu \|\mathbf{S}\| \tilde{\mathfrak{R}} \right) - \gamma \mathbf{S}^T \mathbf{R} \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1} \right) \right) \end{aligned} \quad (37)$$

Với luật cập nhật NN (31) và $\tilde{\mathfrak{R}} = \mathfrak{R} - \hat{\mathfrak{R}} \Rightarrow \dot{\tilde{\mathfrak{R}}} = \dot{\mathfrak{R}} - \dot{\hat{\mathfrak{R}}}$, \dot{V}_3 được xác định như sau:

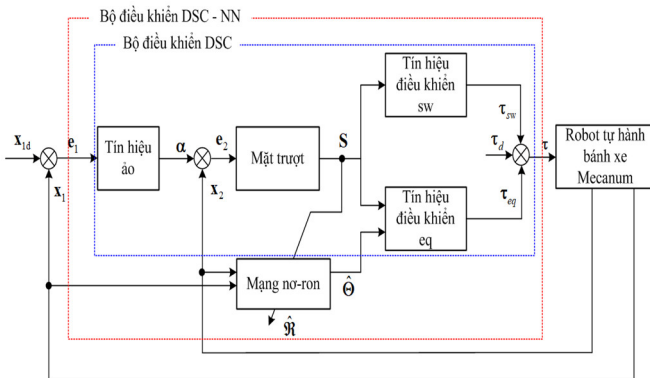
$$\dot{V}_3 = -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \epsilon + \mu \|\mathbf{S}\| \text{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T (\mathfrak{R} - \hat{\mathfrak{R}})) \quad (38)$$

Theo Cauchy-Schwarz:

$$\text{tr}(\tilde{\mathfrak{R}}^T (\mathfrak{R} - \hat{\mathfrak{R}})) \leq \|\tilde{\mathfrak{R}}\|_F \|\mathfrak{R}\|_F - \|\hat{\mathfrak{R}}\|_F^2 \quad (39)$$

Từ đó suy ra:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &\leq -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \mathbf{S}^T \mathbf{R} \epsilon + \mu \|\mathbf{S}\| \left(\|\tilde{\mathfrak{R}}\|_F \|\mathfrak{R}\|_F - \|\hat{\mathfrak{R}}\|_F^2 \right) \\ &\leq -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T c_3 \mathbf{S} + \|\mathbf{S}\| \epsilon_N + \mu \|\mathbf{S}\| \left(\|\tilde{\mathfrak{R}}\|_F \|\mathfrak{R}\|_F - \|\hat{\mathfrak{R}}\|_F^2 \right) \end{aligned} \quad (40)$$



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc BDK DSC kết hợp NN

Với điều kiện chặn (32), \dot{V}_3 trở thành:

$$\dot{V}_3 \leq -\mathbf{S}^T c_2 \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mu \|\mathbf{S}\| \left(\|\tilde{\mathfrak{R}}\|_F - \frac{1}{2} \|\mathfrak{R}\|_F \right)^2 \quad (41)$$

$\dot{V}_3 \leq 0$ thỏa mãn tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.

Sơ đồ cấu trúc BDK DSC kết hợp NN được xác định như hình 2.

4. MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

4.1. Cài đặt các tham số mô phỏng

a) Tham số chuyển động

Quỹ đạo chuyển động của MWMR được chọn là đường tròn có bán kính $R = 5$ (m), $\beta = \frac{\pi}{15}$

$$\mathbf{q}_f = \left[R \cos(\beta t) \quad R \sin(\beta t) \quad \left(\beta t + \frac{\pi}{2} \right) \right]^T \quad (42)$$

b) Thông số kích thước động học và quán tính

Bảng 1 là thông số kích thước động học và quán tính của MWMR.

Bảng 1. Dữ liệu thiết kế và quán tính của MWMR

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khoảng cách hai bánh trái phải	L	316	mm
Khoảng cách hai bánh trước sau	d	270	mm
Bán kính bánh xe	r	30	mm
Khoảng cách trục bánh xe đến trục con lăn	r _{OL}	24	mm
Khối lượng thân robot	m _b	7688	g
Khối lượng mỗi bánh xe mecanum	m _w	86,00	g
Momen quán tính thân robot	J _{Gt}	139902537	g.mm ²
Momen quán tính bánh xe đối với trục quay của nó	J _{ob}	31895	g.mm ²
Momen quán tính bánh xe 1 đối với G _{Z_R}	J _{Gb1}	3663918	g.mm ²
Momen quán tính bánh xe 2 đối với G _{Z_R}	J _{Gb2}	3664317	g.mm ²
Momen quán tính bánh xe 3 đối với G _{Z_R}	J _{Gb3}	3669968	g.mm ²
Momen quán tính bánh xe 4 đối với G _{Z_R}	J _{Gb4}	3671808	g.mm ²

c) Thông số BDK

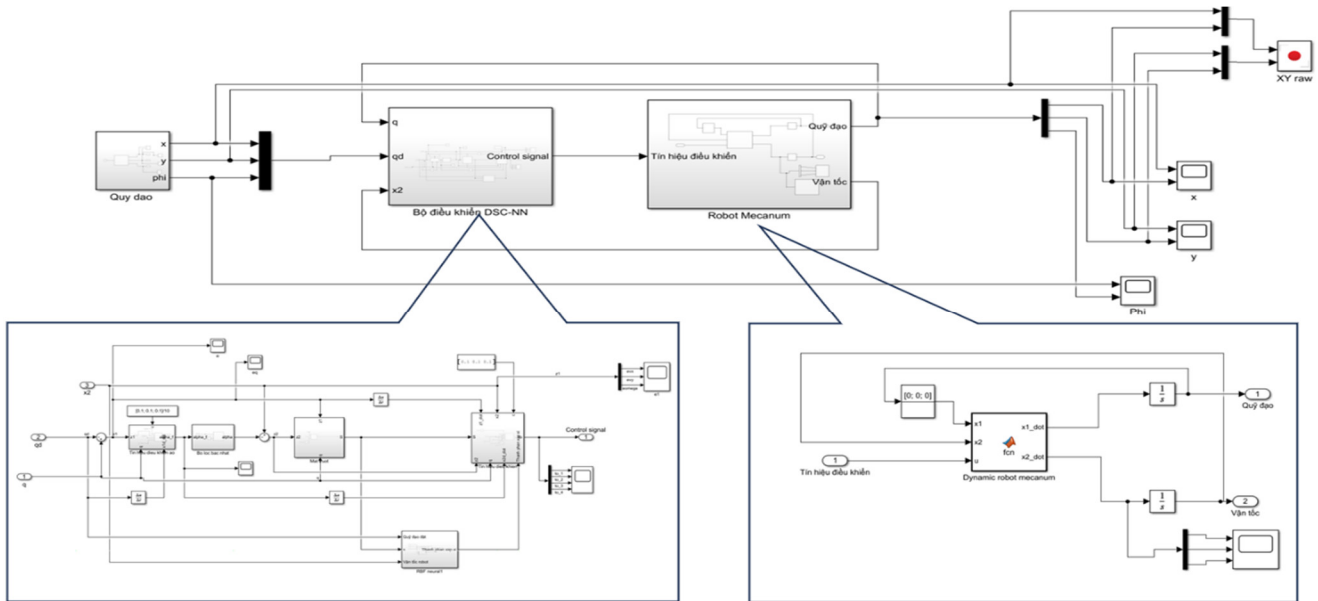
Các hệ số điều khiển được chọn như sau:

$$c_1 = c_2 = c_3 = [0,1 \quad 0,1 \quad 0,1]^T; \lambda = \text{diag}(0,01;0,01;0,01)$$

$$\Xi = \text{diag}(1,1,1); \mu = 0,1.$$

4.2. Sơ đồ khối BDK trên phần mềm Matlab/Simulink

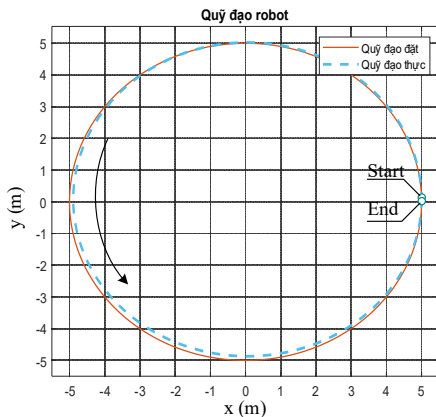
Từ mô hình động lực học MWMR và BDK được trình bày ở mục 2 và 3 ta có sơ đồ khối BDK DSC kết hợp NN được xây dựng trong Matlab/Simulink được mô tả trong hình 3.



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng MWMR bám quỹ đạo chuyển động trên Matlab/Simulink

4.3. Kết quả và thảo luận

Từ các thông số cài đặt được trình bày chi tiết trong mục 3.1 và 3.2, hình 4 mô tả quá trình bám quỹ đạo của robot MWMR khi xét đến các nhiễu bất định được điều khiển bởi BDK DSC kết hợp mạng NN được thiết kế bởi nghiên cứu này.

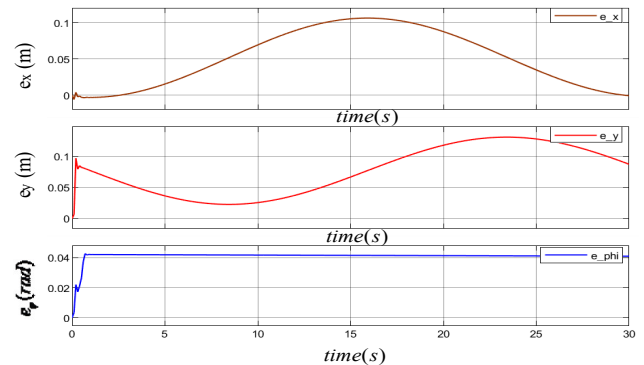


Hình 4. So sánh quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực

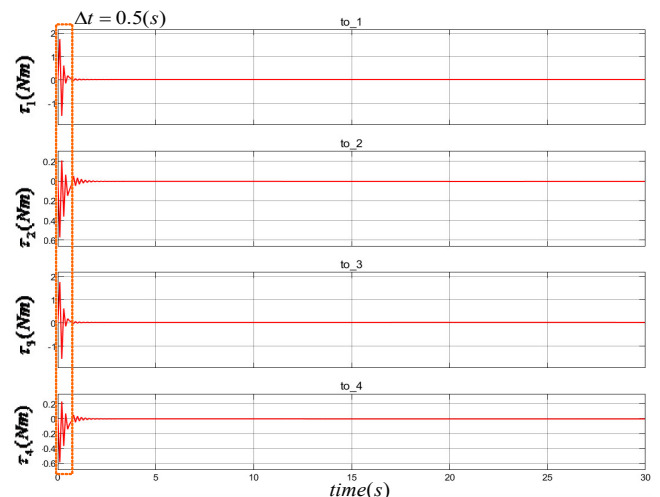
Hình 4 cho thấy quỹ đạo điều khiển bám theo quỹ đạo đặt. Kết quả mô phỏng sai lệch vị trí và hướng của MWMR trong quá trình chuyển động được biểu diễn ở hình 5 với sai số vị trí biến đổi từ 0,0124 (m) đến 0,0176 (m), trong khi sai số về tư thế là từ 0 (rad) đến 0,04 (rad). Hình 6 là mô men của 4 động cơ ở bốn bánh được điều khiển bởi BDK để xuất để robot MWMR bám theo quỹ đạo cho trước.

Từ hình 6 cho thấy, tại thời điểm quá độ ban đầu trong khoảng thời gian 0,5 giây giá trị mô men ở các động cơ có sự thay đổi, sau khi bám quỹ đạo giá trị này tương đối ổn

định và đều giữa các động cơ và MWMR được điều khiển với vận tốc góc không đổi $\Omega = 0,21$ (rad/s).



Hình 5. Sai lệch vị trí và hướng MWMR trong quá trình chuyển động



Hình 6. Mô men điều khiển 4 động cơ truyền động của MWMR

5. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã trình bày được mô hình động học, động lực học của robot MWMR khi xét ảnh hưởng của

thông số hằng bất định và nhiễu ngoại tác động. Chúng minh được sự ổn định của ĐK trượt động kết hợp NN chuyển động với quỹ đạo hình tròn. Tính ổn định tiệm cận của hệ thống được phân tích dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov và chất lượng hoạt động của MWMMR được kiểm nghiệm thông qua mô phỏng kỹ thuật số. Tuy nhiên các kết quả của bài báo mới chỉ dừng lại ở phân tích lý thuyết và khảo sát qua mô phỏng số. Tuy đã cố gắng mô phỏng gần chính xác với đối tượng thực, nhưng để có thể áp dụng được cho robot MWMMR còn đòi hỏi phải thực thi trong thực tế và hoàn thiện hơn nữa thuật toán điều khiển với môi trường chuyển động của xe có vật cản động và tĩnh. Đó là hướng tiếp theo của nhóm nghiên cứu trong thời gian tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Trinh Thi Khanh Ly, et al., "Determination of Kinematic Control Parameters of Omnidirectional AGV Robot with Mecanum Wheels Track the Reference Trajectory and Velocity," *International Conference on Engineering Research and Applications*, 2020.
- [2]. Ly Thi Khanh Trinh, Hoang Thien, "Bézier trajectory tracking control of The Omnidirectional Mobile Robot based on a linear time-varying state feedback controller," *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, 25, 2, 2444-2452, 2022.
- [3]. T. Giurgiu, C. Puiică, C. Pupăză, F. A. Nicolescu, M. Zapciu, "Mecanum wheel modeling for studying roller-ground contact issues," *U.P.B. Sci. Bull.*, 79, 2, 2017.
- [4]. L. Schulze, S. Behling, S. Buhrs, "Development of a micro drive under tractor research and application," in *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, 2011.
- [5]. B. Tao, X. Zhao, S. Yan, H. Ding, "Kinematic modeling and control of mobile robots for large-scale workpiece machining," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022.
- [6]. Trinh Thi Khanh Ly, et al., "Dynamic modelling and numerical simulation of industrial AGVs when taking into account the payload and friction between the wheel and the road surface," *Conference of 1st Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering*, 2023.
- [7]. Nguyen T.H., Nguyen T.Q. "A kinematic control algorithm for blasthole drilling robotic arm in tunneling," *Sci. Technol. Dev. J.*, 20, K5, 13-22, 2017.
- [8]. S. Ransom, O. Krömer, M. Lückemeier, "Planetary rovers with mecanum wheels," *16th ISTVS Intl Conf*, Torino, 2008.
- [9]. H. Hoyer, U. Borgolte, A. Jochheim, "The OMNI-Wheelchair-State of the art," in *Proceedings of Conference on Technology and Persons with Disabilities*, Los Angeles, 1999.
- [10]. P. E. Hsu, Y. L. Hsu, J. M. Lu., "An intelligent robotic wheelchair integrated with advanced robotic and telehealth solutions," in *1st Asia Pacific eCare and TeleCare Congress*, Taiwan, 2011.
- [11]. P. F. Muir, C. P. Neuman, *Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot*. Autonomous robot vehicles, New York, 1999.
- [12]. T. Braunl, *Embedded Robotics Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*, first ed. Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [13]. M. Hijikata, R. Miyagusuku, K. Ozaki, "Wheel Arrangement of Four Omni Wheel Mobile Robot for Compactness," *Applied Sciences*, 12(12), 5798, 2022.
- [14]. H. Taheri, C. X. Zhao, *Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches*. Mechanism and Machine Theory, 2020.
- [15]. D. Wang, W. Wei, Y. Yeboah, Y. Li, Y. Gao, "A robust model predictive control strategy for trajectory tracking of omni-directional mobile robots," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 98, 439-453, 2020.
- [16]. Khanh Ly Trinh Thi, Hong Thai Nguyen, "Path tracking control for car-like robots by pid controller with time-varying parameters," *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*, 5, 3, 1642-1650, 2022.
- [17]. Nguyen Hong Thai, et al., "Trajectory tracking control of AGV mobile robot by time-varying parameter PID controller," in *National Conference on Dynamics and Control*, Hanoi University of Science and Technology, 2022.
- [18]. Trinh Thi Khanh Ly, et al., "Dynamic Simulation of Differential-Driven Mobile Robot Taking into Account the Friction Between the Wheel and the Road Surface," in *International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development*, 2023.
- [19]. P. S. Yadav, V. Agrawal, J. C. Mohanta, M. F. Ahmed, "A robust sliding mode control of mecanum wheel-chair for trajectory tracking," *Materials Today: Proceedings*, 56, 2, 623-630, 2022.
- [20]. R. Zhang, H. Hu, Y. Fu, "Trajectory tracking for omnidirectional mecanum robot with longitudinal slipping," *MATEC Web of Conferences*, 256, 2019.
- [21]. Nguyen Hong Thai, Trinh Thi Khanh Ly, "NURBS Curve Trajectory Tracking Control for Differential-Drive Mobile Robot by a Linear State Feedback Controller," in *International Conference on Engineering Research and Applications*, 2021.
- [22]. N. Zijie, L. Qiang, C. Yonjie, S. Zhijun, "Fuzzy Control Strategy for Course Correction of Omnidirectional Mobile Robot," *International Journal of Control Automation and Systems*, 17, 2354-2364, 2019.
- [23]. Nguyen Hong Thai, et al., "Obstacle Avoidance Algorithm for Autonomous Mobile Robots in the Indoor Environment," in *International Conference on Engineering Research and Applications*, 2022.
- [24]. T. T. K. Ly, et al., "A Neural Network Controller Design for the Mecanum Wheel Mobile Robot," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 13, 2, 2023.
- [25]. Nguyen Thi Thanh, et al., "Dynamics simulation of a mecanum-wheeled omnidirectional mobile robots," in *6th International Conference on Engineering and Research Applications - ICERA*, 2023.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thi Thanh, Vo Thu Ha

Faculty of Electrical and Automation Engineering, University of Economics - Technology for Industries, Vietnam