

# Điều khiển cho robot bốn bánh mecanum bằng bộ điều khiển mặt trượt động trên cơ sở logic mờ

## Dynamic sliding mode control based on fuzzy logic for a four - wheel mecanum robot

Võ Thu Hà<sup>1</sup>, Thân Thị Thương<sup>1,\*</sup>, Đàm Quang Huệ<sup>2</sup> and Nguyễn Văn Ninh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical-Automation Engineering, University of Economics - Technology for Industries (UNETI), Ha-noi, Vietnam

<sup>2</sup>Electric Power University (EPU), Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>DHTD15A3HN, Faculty of Electrical-Automation Engineering, University of Economics - Technology for Industries

\*Corresponding author E-mail: ttthuong.dien@uneti.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i4.324>

### Abstract

This paper focuses on developing the kinematic and dynamic models of a four-wheeled mecanum mobile robot, taking into account friction effects, external disturbances, and modeling uncertainties. Based on these models, a Dynamic Surface Control (DSC) algorithm is designed and integrated with a fuzzy logic mechanism to adjust control parameters in real time adaptively. The controller is developed with the aim of ensuring closed-loop stability and maintaining accurate trajectory tracking even under conditions of unknown friction, torque disturbances, and parameter variations. The stability and convergence of the Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Control (AFDSC) are formally proven using Lyapunov theory. The effectiveness of the proposed approach is then evaluated and compared with the conventional DSC controller through simulations in MATLAB/Simulink, considering friction, disturbances, and model uncertainties.

**Keywords:** Adaptive fuzzy logic controller; Dynamic Surface Control (DSC); Fuzzy Logic System (FLS); Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Control (AFDSC); Mecanum wheel mobile robot(MWMMR)

### Symbols

| Symbols                                                                                     | Units | Description            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------|
| $x_P \ O_P \ y_P$                                                                           |       | Hệ trục tọa độ gốc     |
| $x_l \ O_l \ y_l$                                                                           |       | Hệ trục tọa độ trên xe |
| $\mathbf{q} = [x, y, \theta]^T$                                                             |       | Vị trí của Robot       |
| $m_t$                                                                                       | Kg    | Khối lượng của robot   |
| $2a$                                                                                        | m     | Khoảng cách 2 bánh xe  |
| $2b$                                                                                        | m     | Khoảng cách 2 trục     |
| $r$                                                                                         | m     | Bán kính bánh xe       |
| $\theta$                                                                                    | rad   | Góc hướng của robot    |
| $v_{xi}, v_{yi}, v_{\omega i}$                                                              | m/s   | Vận tốc bánh xe        |
| $\mathbf{V}_l = [v_{lx} \ v_{ly} \ \omega_z]^T$                                             | m/s   | Vận tốc robot          |
| $\mathbf{V}_\omega = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4]^T$ | rad/s | Vận tốc góc bánh xe    |

đến ảnh hưởng của ma sát, nhiễu bên ngoài và các sai số trong quá trình mô hình hóa. Trên nền tảng các mô hình đó, một thuật toán điều khiển Mặt trượt Động (Dynamic Surface Control – DSC) được phát triển và kết hợp với hệ mờ nhằm điều chỉnh thích nghi các tham số điều khiển theo thời gian thực. Bộ điều khiển được thiết kế với mục tiêu bảo đảm tính ổn định của vòng kín và duy trì khả năng bám quỹ đạo chính xác ngay cả khi tồn tại ma sát không xác định, nhiễu mô-men hay sai lệch tham số. Tính ổn định cũng như sự hội tụ của hệ thống điều khiển Mặt trượt Động kết hợp thích nghi mờ (AFDSC) được chứng minh dựa trên lý thuyết Lyapunov. Hiệu quả của phương pháp đề xuất sau đó được đánh giá và so sánh với bộ điều khiển DSC truyền thống thông qua các mô phỏng trên MATLAB/Simulink, trong đó có tính đến yếu tố ma sát, nhiễu và sai lệch mô hình.

### 1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, robot di động sử dụng bánh Mecanum (MWMMR) đã thu hút sự quan tâm đáng kể nhờ khả năng di chuyển đa hướng linh hoạt, qua đó trở thành lựa chọn phù hợp cho nhiều ứng dụng như tự động hóa kho vận, giám sát thông minh hay các nhiệm vụ yêu cầu tính cơ động cao [1–8]. Một trong những yếu tố quan trọng quyết định đến hiệu quả hoạt động của MWMMR trong môi trường biến động và nhiễu bất định là khả năng bám quỹ đạo chính xác [9–11]. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các chiến lược điều khiển dựa trên thuật toán thông minh cho loại robot này đang trở thành hướng tiếp cận nổi bật, với nhiều giải pháp được đưa ra, từ các

### Abbreviations

|       |                                                |
|-------|------------------------------------------------|
| MWMMR | Mecanum Wheels Mobile Robot                    |
| DSC   | Dynamic Surface Control                        |
| AFDSC | Adaptive Fuzzy Dynamic Sliding Mode Controller |

### Tóm tắt

Bài báo này tập trung vào việc xây dựng mô hình động học và động lực học của robot di động bốn bánh mecanum, trong đó có xét

phương pháp điều khiển truyền thống đến các kỹ thuật hiện đại nhằm nâng cao độ ổn định cũng như độ chính xác của hệ thống.

Các kỹ thuật điều khiển cổ điển như PID [12–14] hay tuyến tính hóa phản hồi [15–16] vẫn được áp dụng rộng rãi nhờ ưu điểm cấu trúc gọn nhẹ và dễ cài đặt, đặc biệt hiệu quả khi hệ thống ít chịu tác động của nhiễu và các yếu tố phi tuyến. Tuy nhiên, trong bối cảnh hệ thống có tính phi tuyến mạnh và mô hình tồn tại nhiều bất định, các giải pháp hiện đại thường được thiết kế theo cấu trúc hai tầng: tầng động học bảo đảm robot bám theo quỹ đạo tham chiếu dựa trên phân tích Lyapunov, trong khi tầng động lực học sinh ra các tín hiệu điều khiển phù hợp với trạng thái thực tế. Một số hướng tiếp cận nổi bật có thể kể đến gồm: điều khiển trượt (SMC) [17–18], phương pháp Backstepping [19–21], điều khiển thích nghi [22–23], các mô hình mạng nơ-ron [24–26] và kỹ thuật logic mờ [17–20]. Trong đó, điều khiển trượt được biết đến với khả năng chống nhiễu cao nhưng lại thường gây ra hiện tượng rung (chattering). Phương pháp Backstepping phát huy hiệu quả khi xử lý sai lệch tham số, song gặp hạn chế trong môi trường có nhiễu lớn hoặc khi bề mặt điều khiển thay đổi nhanh. Ngược lại, điều khiển thích nghi cho thấy ưu thế trong việc bù trừ sai số mô hình động lực học [22–24]. Đặc biệt, nhóm tác giả Fukao [27] và tác giả Yoo [28,29] đã mở rộng cách tiếp cận này bằng việc đưa yếu tố ma sát và các phi tuyến thực tế vào mô hình điều khiển, giúp nâng cao tính khả dụng.

Bên cạnh đó, việc kết hợp điều khiển thích nghi với mạng nơ-ron hoặc hệ mờ [30–31] đã được chứng minh là một hướng tiếp cận hiệu quả, giúp tăng cường khả năng xấp xỉ các thành phần chưa biết [25,26] và tự động điều chỉnh tham số khi điều kiện vận hành thay đổi. Trên cơ sở những kết quả này [30], nghiên cứu đề xuất một bộ điều khiển mới cho robot MWMR, gọi là bộ điều khiển Mặt trượt Động kết hợp thích nghi mờ (Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Control – AFDSC). Phương pháp DSC vốn nổi bật ở khả năng hạn chế hiện tượng rung và rút ngắn quá trình hội tụ của các hệ phi tuyến, tuy nhiên lại gặp thách thức trong việc xác định tham số điều khiển tối ưu, đòi hỏi kiến thức chuyên sâu từ người thiết kế. Để khắc phục hạn chế đó, AFDSC được phát triển bằng cách tích hợp cơ chế logic mờ nhằm tự động tinh chỉnh các tham số trong DSC, từ đó nâng cao tính linh hoạt và hiệu quả điều khiển, đặc biệt trong những tình huống chịu ảnh hưởng của nhiễu hay sai số mô hình không xác định trước.

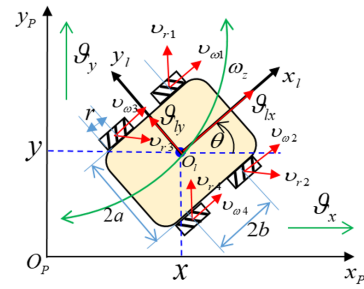
Hiệu quả của thuật toán điều khiển được đánh giá thông qua các mô phỏng trên nền tảng MATLAB/Simulink, có xét đến ảnh hưởng của ma sát, nhiễu bên ngoài và sai số mô hình. Kết quả thu được cho thấy hệ thống duy trì được khả năng bám quỹ đạo tốt và đảm bảo tính ổn định cao. Bố cục của bài báo được sắp xếp như sau: Phần 2 trình bày mô hình toán học của hệ thống MWMR; Phần 3 mô tả chi tiết thuật toán AFDSC, cùng với các kết quả mô phỏng và so sánh với các phương pháp điều khiển khác; cuối cùng, phần 4 đưa ra kết luận và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

## 2. Động học, động lực học cho robot

### 2.1 Động học

Xét cấu hình MWMR như hình 1 sau:

Từ Hình 1 ta tính được vận tốc của từng bánh xe theo từng trục của hệ trục tọa độ đặt trên robot  $x_l O_l y_l$  là:



Hình 1: Động học của MWMR

$$\begin{aligned} v_{x1} &= v_{\omega 1} + \frac{v_{r1}}{\sqrt{2}}, & v_{y1} &= \frac{v_{r1}}{\sqrt{2}}; \\ v_{x2} &= v_{\omega 2} + \frac{v_{r2}}{\sqrt{2}}, & v_{y2} &= -\frac{v_{r2}}{\sqrt{2}}; \\ v_{x3} &= v_{\omega 3} + \frac{v_{r3}}{\sqrt{2}}, & v_{y3} &= -\frac{v_{r3}}{\sqrt{2}}; \\ v_{x4} &= v_{\omega 4} + \frac{v_{r4}}{\sqrt{2}}, & v_{y4} &= \frac{v_{r4}}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (1)$$

Vận tốc của mỗi bánh xe trên hệ tọa độ đặt trên robot  $x_l O_l y_l$  là:

$$\begin{aligned} v_{x1} &= v_x - a\omega_z, & v_{y1} &= v_y + b\omega_z; \\ v_{x2} &= v_x + a\omega_z, & v_{y2} &= v_y + b\omega_z; \\ v_{x3} &= v_x - a\omega_z, & v_{y3} &= v_y - b\omega_z; \\ v_{x4} &= v_x + a\omega_z, & v_{y4} &= v_y - b\omega_z \end{aligned} \quad (2)$$

Từ (1) và (2) ta có:

$$\begin{cases} v_{\omega 1} = \dot{\theta}_1 = v_{lx} - v_{ly} - (b+a)\omega_z \\ v_{\omega 2} = \dot{\theta}_2 = v_{lx} + v_{ly} + (b+a)\omega_z \\ v_{\omega 3} = \dot{\theta}_3 = v_{lx} + v_{ly} - (b+a)\omega_z \\ v_{\omega 4} = \dot{\theta}_4 = v_{lx} - v_{ly} + (b+a)\omega_z \end{cases} \quad (3)$$

Từ công thức (3) ta thấy rằng:

$$\mathbf{V}_{\omega} = \mathbf{J}\mathbf{V}_l \quad (4)$$

Với:

$$\mathbf{V}_{\omega} = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4]^T; \quad \mathbf{V}_l = [v_{lx} \quad v_{ly} \quad \omega_z]^T;$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(b+a) \\ 1 & 1 & (b+a) \\ 1 & 1 & -(b+a) \\ 1 & -1 & (b+a) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Từ (4) và (5) ta suy ra:

$$\mathbf{V}_l = \begin{bmatrix} \dot{x}_l \\ \dot{y}_l \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \frac{r}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -\frac{1}{b+a} & \frac{1}{b+a} & -\frac{1}{b+a} & \frac{1}{b+a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Theo Hình 1 ta có vận tốc của robot sẽ được tính:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \mathbf{V}_l = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{lx} \\ v_{ly} \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó:  $\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  là ma trận chuyển

đổi trạng thái;  $\mathbf{V}_l = [v_{lx} \ v_{ly} \ \omega_z]^T$  là vận tốc của robot trên hệ tọa độ  $x_l O_l y_l$ .

Từ công thức (7) ta có:

$$\mathbf{V}_l = \mathbf{R}(\theta)^{-1} \dot{\mathbf{q}} \quad (8)$$

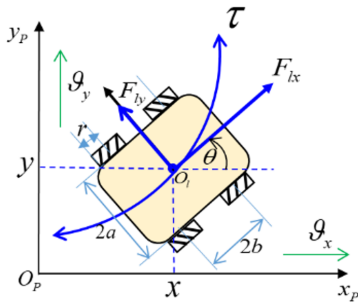
Thay vào (4) ta có:

$$\mathbf{V}_\omega = \mathbf{J} \mathbf{V}_l = \mathbf{J} \mathbf{R}(\theta)^{-1} \dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

Với:

$$\mathbf{V}_\omega = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4]^T, \quad \dot{\mathbf{q}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\theta}]^T \quad (10)$$

## 2.2 Động lực học



**Hình 2:** Sơ đồ lực và momen tác động chuyển động cho MWMR

Dựa trên phương pháp Newton, ta có:

$$\begin{cases} m \frac{dv_{lx}}{dt} = \sum F_{lx} - F_{Blx} - F_{Clx} \\ m \frac{dv_{ly}}{dt} = \sum F_{ly} - F_{Bly} - F_{Cly} \\ I \frac{d\omega_z}{dt} = \sum \tau - \tau_{B\omega} - \tau_{C\omega} \end{cases} \quad (11)$$

Với:

$$F_{Blx} = B_x \operatorname{sgn}(v_{lx}); \quad F_{Bly} = B_y \operatorname{sgn}(v_{ly}); \quad \tau_{B\omega} = B_\omega \operatorname{sgn}(\omega_z);$$

Ma sát nhớt

$$F_{Clx} = C_x \operatorname{sgn}(v_{lx}); \quad F_{Cly} = C_y \operatorname{sgn}(v_{ly}); \quad \tau_{C\omega} = C_\omega \operatorname{sgn}(\omega_z);$$

Ma sát Coulomb

Mà từ hình 2 ta có lực theo các trục và momen được tính như sau (con lăn nghiêng với trục bánh xe 1 góc 45 độ):

$$\begin{cases} F_{lx} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \frac{\sqrt{2}}{2r} \\ F_{ly} = (-\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 - \tau_4) \frac{\sqrt{2}}{2r} \\ \tau = (-\tau_1 + \tau_2 - \tau_3 + \tau_4) \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{r} \end{cases} \quad (12)$$

Thay (12) vào (11) ta được:

$$\begin{cases} m \frac{dv_{lx}}{dt} + B_x v_{lx} + C_x \operatorname{sgn}(v_{lx}) = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \frac{\sqrt{2}}{2r} \\ m \frac{dv_{ly}}{dt} + B_y v_{ly} + C_y \operatorname{sgn}(v_{ly}) = (-\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 - \tau_4) \frac{\sqrt{2}}{2r} \\ I \frac{d\omega_z}{dt} + B_\omega \omega_z + C_\omega \operatorname{sgn}(\omega_z) = (-\tau_1 + \tau_2 - \tau_3 + \tau_4) \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{r} \end{cases} \quad (13)$$

Từ (13) ta có:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{lx} \\ \dot{v}_{ly} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x + C_x & 0 & 0 \\ 0 & B_y + C_y & 0 \\ 0 & 0 & B_\omega + C_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(v_{lx}) \\ \operatorname{sgn}(v_{ly}) \\ \operatorname{sgn}(\omega_z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2r} & \frac{\sqrt{2}}{2r} & \frac{\sqrt{2}}{2r} & \frac{\sqrt{2}}{2r} \\ \frac{\sqrt{2}}{2r} & -\frac{\sqrt{2}}{2r} & -\frac{\sqrt{2}}{2r} & \frac{\sqrt{2}}{2r} \\ \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{r} & \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{r} & \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{r} & \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{M} \dot{\mathbf{V}}_l + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\mathbf{V}_l) + \boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{B} \boldsymbol{\tau} \quad (14)$$

Với:

$$\mathbf{V}_l = [v_{lx} \ v_{ly} \ \omega_z]^T \text{ là vận tốc của robot trên } X_l O_l Y_l;$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_l & 0 & 0 \\ 0 & m_l & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \text{ là ma trận quán tính;}$$

$$\mathbf{F}_s = \begin{bmatrix} B_x + C_x & 0 & 0 \\ 0 & B_y + C_y & 0 \\ 0 & 0 & B_\omega + C_\omega \end{bmatrix} \text{ là thành phần ma sát;}$$

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4]^T \text{ là moment; } \boldsymbol{\tau}_d \text{ là nhiễu;}$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\sqrt{a^2 + b^2} & \sqrt{a^2 + b^2} & \sqrt{a^2 + b^2} & -\sqrt{a^2 + b^2} \end{bmatrix}$$

## 3. Thuật toán điều khiển mặt trượt động thích nghi logic mờ

### 3.1 Thuật toán điều khiển Mặt trượt động cho MWMR

#### 3.1.1 Thuật toán điều khiển

Phương pháp điều khiển trượt được đánh giá cao nhờ khả năng xử lý hiệu quả các hệ thống phi tuyến có yếu tố bất định,

đồng thời duy trì sự ổn định trước tác động của nhiễu bên ngoài. Các nghiên cứu trước đây [17-18] đã chứng minh tính ứng dụng rộng rãi của phương pháp này trong lĩnh vực điều khiển robot, đặc biệt đối với robot di động hai bánh vi sai (MWMR). Mục tiêu trọng tâm khi xây dựng bộ điều khiển là giúp robot bám sát quỹ đạo với độ chính xác cao, phản ứng nhanh và vận hành ổn định. Để đáp ứng yêu cầu này, bộ điều khiển mặt trượt động (Dynamic Surface Control – DSC) đã được phát triển và áp dụng cho hệ thống MWMR.

Đặt biến trạng thái:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 = \mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T \\ \mathbf{x}_2 = \mathbf{V}_l(t) = [\dot{x}_l \ \dot{y}_l \ \dot{\omega}_z]^T \end{cases} \quad (15)$$

Kết hợp phương trình động học (7) và phương trình (15) ta có hệ phương trình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{x}_2 \\ \mathbf{M}(q)\dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}\mathbf{x}_2 + \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_2) + \boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{B}(q)\boldsymbol{\tau} \end{cases} \quad (16)$$

Ta đặt sai lệch quỹ đạo  $e_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d}$ , với

$$\mathbf{x}_{1d} = \mathbf{q}_d = [x_{1d} \ y_{1d} \ \theta_{1d}]^T \text{ là quỹ đạo đặt}$$

$$\Rightarrow \dot{e}_1 = \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{1d} = \mathbf{R}(\theta)\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{1d} \quad (17)$$

Đặt  $\zeta_r$  là tín hiệu điều khiển ảo và  $\zeta$  của đầu vào bộ lọc thông thấp bậc nhất sẽ được tính:

$$\zeta = -\mathbf{R}(\theta)^{-1}(\mathbf{K}_1 e_1 - \dot{\mathbf{x}}_{1d}) \quad (18)$$

Với

$$\mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} K_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{1\theta} \end{pmatrix} \text{ là thông số xác định dương.}$$

Và mối quan hệ của  $\zeta_r$  và  $\zeta$  sẽ được viết như sau:

$$T\dot{\zeta}_r + \zeta_r = \zeta \quad (19)$$

$T$  chọn nhỏ phù hợp ( $T = 0.001$ )

$$\zeta_r(s) = \frac{\zeta(s)}{Ts + 1}, \quad \dot{\zeta}_r = \frac{\zeta - \zeta_r}{T} \quad (20)$$

Chọn hàm Lyapunov:

$$\mathbf{V}_1 = \frac{1}{2} \mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_1 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_1 &= \mathbf{e}_1^T \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_1^T (\mathbf{R}(\theta)\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{1d}) \\ &= -\mathbf{e}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T (\mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{R}(\theta)\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_{1d}) \end{aligned} \quad (22)$$

Nếu ta giả thiết  $\mathbf{x}_2 = \zeta$  thì

$$\dot{\mathbf{V}}_1 = -\mathbf{e}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_1^T \dot{\mathbf{K}}_1 (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_1)$$

$$\Rightarrow \dot{\mathbf{V}}_1 = -\mathbf{e}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1 \leq 0 \text{ nên tín hiệu ảo (19) là khả dụng.}$$

Sai lệch của tín hiệu ảo được tính:

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \zeta_r \quad (23)$$

Chọn mặt trượt:

$$\mathbf{S} = \lambda \mathbf{e}_1 + \mathbf{R}(\theta)\mathbf{e}_2 \quad (24)$$

trong đó  $\lambda$  là hệ số của mặt trượt.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{S}} &= \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \mathbf{R}(\theta)\dot{\mathbf{e}}_2 + \dot{\mathbf{R}}(\theta)\mathbf{e}_2 \\ &= \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{R}}(\theta)\mathbf{e}_2 + \mathbf{R}(\theta) \left( \mathbf{M}(q)^{-1} (-\mathbf{C}\mathbf{x}_2 - \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_2) + \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{B}(q)\boldsymbol{\tau}) - \dot{\zeta}_r \right) \end{aligned} \quad (25)$$

Để đảm bảo sự ổn định của hệ thống và khâu chọn lọc được diễn ra hoàn hảo thì hàm Lyapunov thứ hai được lựa chọn.

$$\mathbf{V}_2 = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \Rightarrow \dot{\mathbf{V}}_2 = \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} \quad (26)$$

Từ (17), (23) và (25) ta thấy rằng để sai lệch quỹ đạo  $e_1$  và sai lệch tín hiệu ảo  $e_2$  bằng không thì  $\dot{\mathbf{S}} = 0$ , khi đó ta tính được thành phần moment:

$$\boldsymbol{\tau}_{eq} = -\mathbf{B}(q)^T (\mathbf{B}(q)\mathbf{B}(q)^T)^{-1} \left( \mathbf{M}(q) \left( \mathbf{R}(\theta)^{-1} (\lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{R}}(\theta)\mathbf{e}_2) - \dot{\mathbf{x}}_{2d} \right) - \mathbf{C}\mathbf{x}_2 - \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_2) \right) \quad (27)$$

Để hệ ổn định và hội tụ ta phải đảm bảo  $\dot{\mathbf{V}}_2 \leq 0$ . Giải ngược để tìm bộ điều khiển, do đó ta chọn:

$$\dot{\mathbf{S}} = -\mathbf{K}_2 \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{K}_3 \mathbf{S}$$

và với điều kiện  $\dot{\zeta}_r = \dot{\mathbf{x}}_{2d}$  thì:

$$\dot{\mathbf{V}}_2 = -\mathbf{S}^T \mathbf{K}_2 \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{S}^T \mathbf{K}_3 \mathbf{S} \leq 0 \quad (28)$$

Với

$$\mathbf{K}_2 = \begin{pmatrix} K_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{2y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{2\theta} \end{pmatrix} \text{ và } \mathbf{K}_3 = \begin{pmatrix} K_{3x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{3y} & 0 \\ 0 & 0 & K_{3\theta} \end{pmatrix}$$

là các ma trận xác định dương.

Sử dụng (27),  $\dot{\mathbf{V}}_2$  trở thành

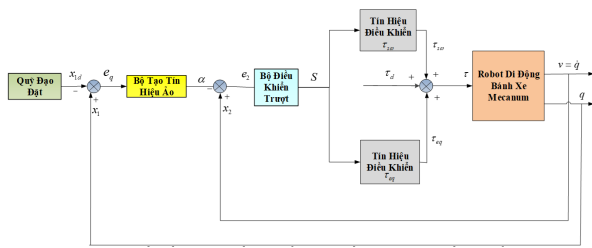
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_2 &= \mathbf{S}^T \left( \lambda \dot{\mathbf{e}}_1 + \dot{\mathbf{R}}(\theta)\mathbf{e}_2 + \mathbf{R}(\theta) \mathbf{M}(q)^{-1} (-\mathbf{C}\mathbf{x}_2 - \mathbf{F}_s \operatorname{sgn}(\mathbf{x}_2) \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{B}(q)(\boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{sw})) - \dot{\zeta}_r \right) \end{aligned} \quad (29)$$

Với moment  $\boldsymbol{\tau}_{eq}$  (27) và tín hiệu ảo (23) thì ta tính được:

$$\boldsymbol{\tau}_{sw} = -\mathbf{B}(q)^T (\mathbf{B}(q)\mathbf{B}(q)^T)^{-1} \mathbf{M}(q) \mathbf{R}(\theta)^{-1} (\mathbf{K}_2 \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) + \mathbf{K}_3 \mathbf{S}) \quad (30)$$

Từ (27) và (30) ta có moment điều khiển được tính:

$$\boldsymbol{\tau}_{dk} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{sw} \quad (31)$$



**Hình 3:** Sơ đồ cấu trúc điều khiển hệ thống với bộ điều khiển DSC

### 3.1.2 Mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện để kiểm chứng với các thông số của mô hình robot: chiều rộng 54 cm, chiều cao 20 cm và chiều dài 80 cm. Khối lượng tổng cộng của robot, bao gồm toàn bộ động cơ và các thành phần khác, đạt 27 kg.

**a. Khi hệ thống không tính đến nhiễu và sai lệch mô hình**

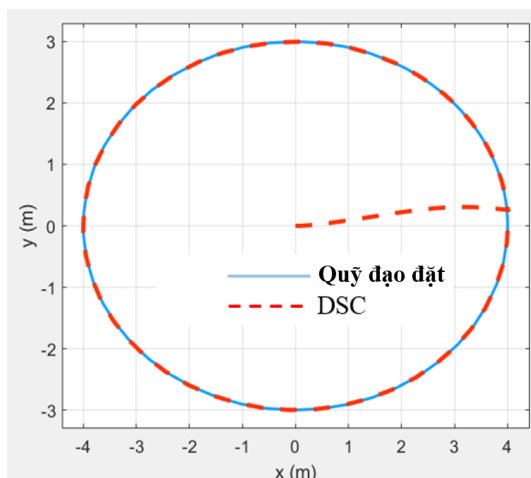
Quý đạo mong muốn:

$$x = 4 \cos\left(\frac{\pi}{15}t\right), \quad y = 3 \sin\left(\frac{\pi}{15}t\right), \quad \theta = \frac{\pi}{15}t + \frac{\pi}{2}$$

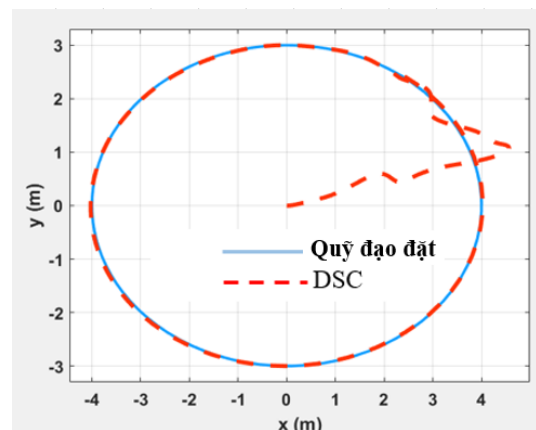
Thông số bộ điều khiển DSC:

$$\boldsymbol{\lambda} = \text{diag}(9, 9, 9); \mathbf{K}_1 = \text{diag}(6, 6, 6);$$

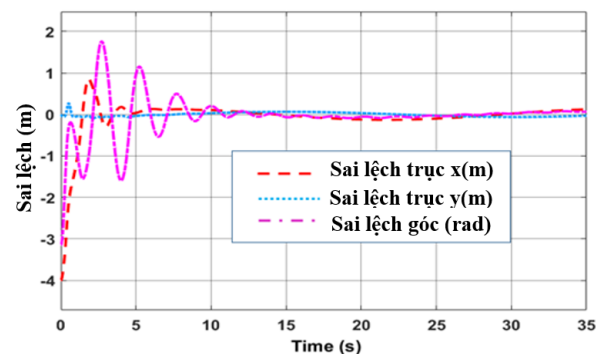
$$\mathbf{K}_2 = \mathbf{K}_3 = \text{diag}(15, 15, 15)$$



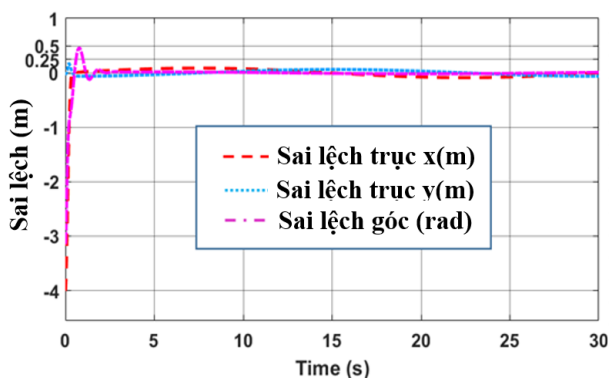
#### Hình 4: Đáp ứng về quỹ đạo



**Hình 6: Đáp ứng quỹ đạo khi có nhiễu**



**Hình 7: Đáp ứng sai lệch khi có nhiễu**



### Hình 5: Đáp ứng về sai lệch

**Nhận xét:** Từ hình 4 và hình 5 ta thấy rằng đáp ứng bám quỹ đạo của hệ thống khi sử dụng bộ điều khiển DSC rất tốt, sai số xác lập nhỏ

$$x_e = 0.031 \text{ (m)}; \quad y_e = 0.042 \text{ (m)}; \quad \theta_e = 0.023 \text{ (rad)}.$$

Nhưng đáp ứng này chỉ đạt được khi các tham số của mô hình ta xác định được, cũng như ta ước lượng được chính xác thành phần nhiễu, và cũng rất khó khăn khi ta tìm ra bộ thông số điều khiển  $(\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3)$ .

### b. Trường hợp có nhiều tác động

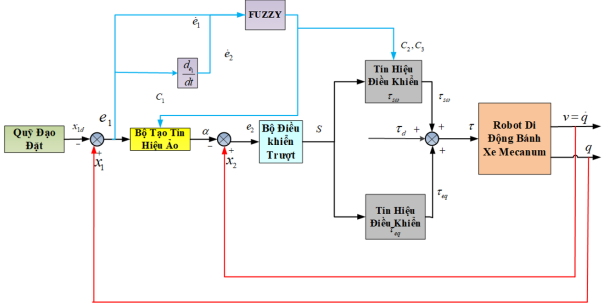
Khi có nhiều tác động và tăng khối lượng tải trọng cho mô hình: Tổng trọng lượng của robot, bao gồm tất cả các động cơ và tất cả các thành phần khác là 50kg.

**Nhận xét kết quả:** Khi vẫn sử dụng bộ tham số đã chọn và cho nhiều ngoại tác động thì ban đầu hệ thống giao động và có sai lệch lớn, trong Hình 7, sai số góc ban đầu đạt gần 2 rad, nguyên nhân do trạng thái xuất phát của robot khác biệt lớn so với hướng tham chiếu, đồng thời công thức tính sai số góc chưa chuẩn hóa về  $[-\pi, \pi]$ . Tuy nhiên, đây chỉ là hiện tượng chuyển tiếp ngắn, sau khoảng 0.2 s sai số giảm nhanh xuống dưới 0.05 rad và duy trì ổn định. Như vậy, bộ điều khiển AFDSC vẫn đảm bảo yêu cầu điều khiển bám quỹ đạo, đồng thời sai số góc thực tế không dẫn đến robot quay ngược hoàn toàn so với hướng tham chiếu. Phải mất khoảng 10s hệ thống mới quay lại trạng thái ổn định nhưng sai lệch cũng tăng  $x_e = 0.142(m)$ ;  $y_e = 0.131(m)$ ;  $\theta_e = 0.113(rad)$ .

3.2 Thuật toán Mặt trượt động trên cơ sở thích nghi logic mờ

3.2.1 Nội dung thuật toán

Khi mô hình hệ thống xuất hiện các yếu tố bất định và chịu tác động từ nhiễu bên ngoài, các tham số trong bộ điều khiển DSC ( $K_1, K_2, K_3$ ) có thể mất đi tính hiệu quả. Để khắc phục hạn chế này, một cơ chế điều chỉnh thích nghi đã được tích hợp thông qua việc ứng dụng logic mờ. Cấu trúc tổng thể của hệ thống điều khiển DSC kết hợp với logic mờ – gọi là AFDSC – được minh họa trong Hình 8 sau đây.



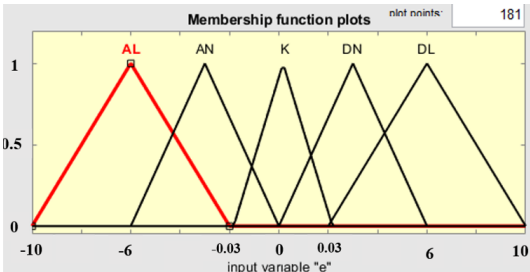
Hình 8: Cấu trúc hệ thống điều khiển với bộ điều khiển AFDSC

Đầu vào bao gồm sai lệch quỹ đạo  $e$  và đạo hàm của sai lệch quỹ đạo  $\dot{e}$  với luật suy diễn mờ trong bảng 1.

$e$ : AL, AN, K, DN, DL       $\dot{e}$ : AL, AN, K, DN, DL

Bảng 1: Biến ngôn ngữ đầu vào

| e  | $\dot{e}$ | Ý nghĩa      |
|----|-----------|--------------|
| AL | AL        | Âm lớn       |
| AN | AN        | Âm nhỏ       |
| K  | K         | Khoảng không |
| DN | DN        | Dương nhỏ    |
| DL | DL        | Dương lớn    |



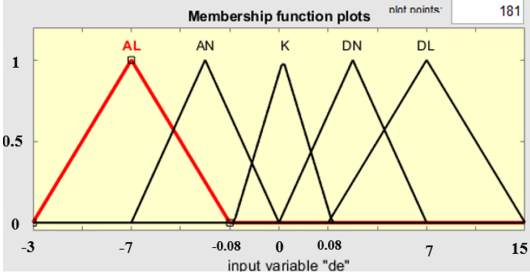
Hình 9: Đầu vào  $e$

Chọn  $K_2 = K_3$

3.2.2 Mô phỏng bộ điều khiển AFDSC trên Matlab

Mô hình nhiễu momen tác động vào hệ thống như hình 13 sau:

Thông số mô hình động học: chiều rộng 54 cm, chiều cao 20cm và chiều dài 80cm. Tổng trọng lượng của robot, bao



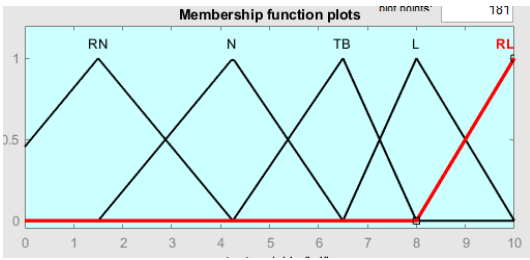
Hình 10: Đầu vào edot

Bảng 2: Hệ luật suy diễn cơ sở cho  $K_1(K_2, K_3)$

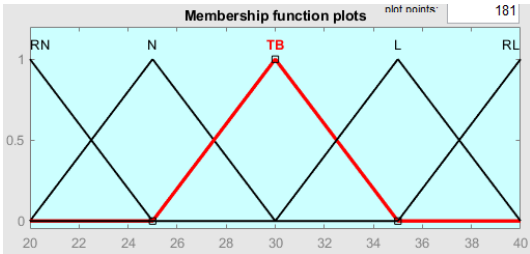
| $\dot{e}$ | e      |        |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | AL     | AN     | K      | DN     | DL     |
| AL        | TB(TB) | N(L)   | RN(RL) | N(L)   | TB(TB) |
| AN        | L(N)   | TB(TB) | N(L)   | TB(TB) | L(N)   |
| K         | RN(RL) | L(N)   | TB(TB) | L(N)   | RN(RL) |
| DN        | L(N)   | TB(TB) | L(N)   | TB(TB) | L(N)   |
| DL        | TB(TB) | N(L)   | RN(RL) | N(L)   | TB(TB) |

Bảng 3: Đầu ra  $K_1 = diag(k_1, k_1, k_1), K_2 = K_3 = diag(k_2, k_2, k_2)$

| Ngôn ngữ | Ý nghĩa    | $k_1$ | $k_2$ |
|----------|------------|-------|-------|
| RN       | Rất nhỏ    | 2     | 10    |
| N        | Nhỏ        | 4.2   | 15    |
| TB       | Trung bình | 6.5   | 20    |
| L        | Lớn        | 8     | 25    |
| RL       | Rất lớn    | 10    | 30    |



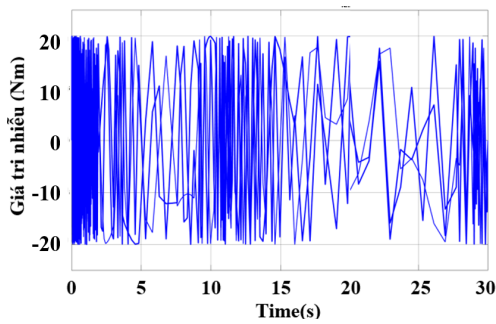
Hình 11: Đầu ra  $k_1$



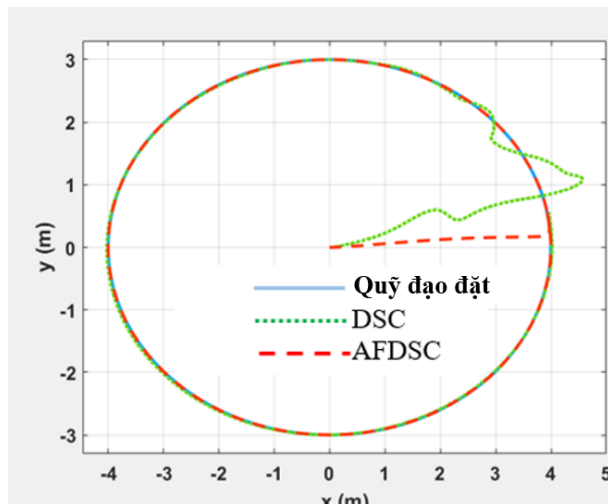
Hình 12: Đầu ra  $k_2$

gồm tất cả các động cơ và tất cả các thành phần khác là 50kg  $\lambda = diag(10, 10, 10)$ .

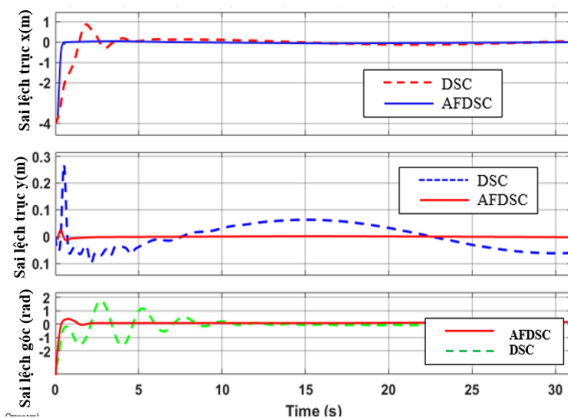
Nhận xét: Hình 14 và 15 minh họa khả năng bám quỹ đạo tròn của hệ thống MWMR khi áp dụng hai chiến lược điều khiển:



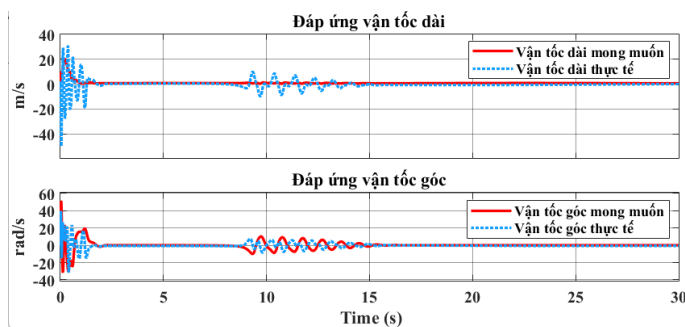
Hình 13: Nhiễu ngoại



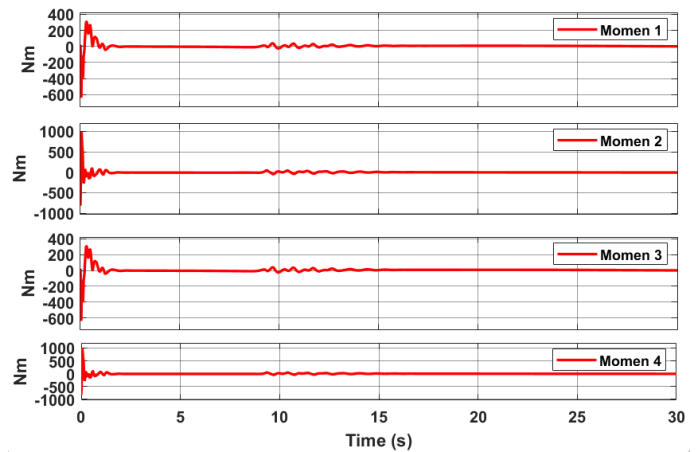
Hình 14: Đáp ứng quỹ đạo



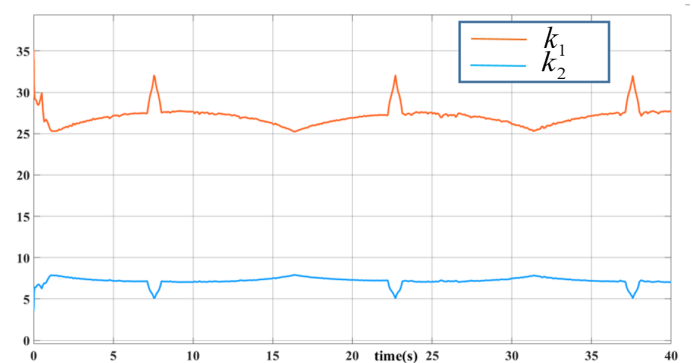
Hình 15: Đáp ứng sai lệch



Hình 16: Đáp ứng vận tốc dài và vận tốc góc với bộ điều khiển AFDSC



Hình 17: Đáp ứng momen điều khiển trên 4 bánh khi với AFDSC

Hình 18: Đáp ứng đầu thông số bộ điều khiển ( $k_1, k_2$ )

DSC và AFDSC. Kết quả cho thấy cả hai bộ điều khiển đều đảm bảo robot di chuyển sát theo quỹ đạo đặt ra. Tuy nhiên, AFDSC thể hiện hiệu năng vượt trội hơn đáng kể. Trong điều kiện mô hình và nhiễu tương đương, MWMR sử dụng AFDSC đạt đến quỹ đạo mong muốn chỉ sau 0,2 giây, trong khi hệ thống sử dụng DSC cần đến gần 10 giây. Sự khác biệt này đến từ khả năng của AFDSC trong việc điều chỉnh thông số của bộ điều khiển DSC điều khiển theo thời gian thực nhờ vào các luật mờ. Điều này giúp hệ thống cải thiện rõ rệt về tốc độ đáp ứng và độ chính xác so với phương pháp DSC truyền thống. Hình 16 biểu diễn vận tốc góc và vận tốc dài của MWMR. Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc dài trong nằm trong khoảng  $\pm 2$  m/s và vận tốc góc trong khoảng  $\pm 10$  rad/s phù hợp với giới hạn phần cứng thực tế. Điều này khẳng định rằng các tham số điều khiển được lựa chọn hợp lý. Ngoài ra trong hình 17 cho thấy tín hiệu điều khiển (mô-men tác động lên các bánh xe) được sinh ra bởi bộ điều khiển DSC. Có thể nhận thấy tín hiệu ổn định, không xuất hiện biên độ đột biến, chứng tỏ tính ổn định và khả năng tránh hiện tượng chattering của bộ điều khiển được đề xuất.

#### 4. Kết luận

Trong công trình này đã thiết lập mô hình động học và động lực học cho robot di động được trang bị bốn bánh xe Mecanum. Với đặc tính phi tuyến của hệ thống, hai bộ điều khiển đã được đề xuất và mô phỏng để kiểm tra hiệu quả: điều khiển Bề mặt Động (DSC) và điều khiển Bề mặt Động thích nghi kết hợp logic mờ (AFDSC), nhằm đảm bảo robot bám theo quỹ đạo đặt

ra. Cả hai phương pháp điều khiển đều được đánh giá về mặt ổn định thông qua lý thuyết Lyapunov và được hiện thực hóa bằng mô phỏng trên nền tảng MATLAB/Simulink. Kết quả thu được cho thấy bộ điều khiển DSC có khả năng đáp ứng nhanh, hiệu suất cao và khả năng chống nhiễu tốt, phù hợp với các hệ thống phi tuyến. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là yêu cầu biết trước biên độ của nhiễu để lựa chọn tham số phù hợp, đồng thời khó áp dụng trong điều kiện tải thay đổi hoặc môi trường vận hành không ổn định. Để khắc phục các hạn chế đó, bộ điều khiển AFDSC đã được phát triển và chứng minh hiệu quả vượt trội với thời gian đáp ứng ngắn, khoảng 0,2 giây, sai số điều khiển nhỏ  $x_e = 0.0014 (m)$ ;  $y_e = 0.0021 (m)$ ;  $\theta_e = 0.0037 (rad)$ , đồng thời nâng cao tính thích nghi và độ ổn định của hệ thống trong các tình huống vận hành phức tạp.

## Tài liệu tham khảo

- [1] T. Giurgiu, C. Puică, C. Pupăză, F. A. Nicolescu, M. Zapciu (2017) *Mecanum wheel modeling for studying roller-ground contact issues*. U.P.B. Sci. Bull.
- [2] L. Schulze, S. Behling, S. Buhrs (2011) *Development of a micro drive under tractor research and application*. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong.
- [3] B. Tao, X. Zhao, S. Yan, H. Ding (2022) *Kinematic modeling and control of mobile robots for large-scale workpiece machining*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.
- [4] S. Ransom, O. Krömer, M. Lückemeier (2008) *Planetary rovers with mecanum wheels*. 16th ISTVS Intl Conf, Torino.
- [5] H. Hoyer, U. Borgolte, A. Jochheim (1999) *The OMNI-Wheelchair-State of the art*. Proceedings of Conference on Technology and Persons with Disabilities, Los Angeles.
- [6] P. E. Hsu, Y. L. Hsu, J. M. Lu. iRW (2011) *An intelligent robotic wheelchair integrated with advanced robotic and telehealth solutions*. 1st Asia Pacific eCare and TeleCare Congress, Taiwan.
- [7] P. F. Muir, C. P. Neuman (1999) *Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot*. Autonomous robot vehicles, New York.
- [8] T. Braunl (2003) *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*. 1st ed., Springer-Verlag, Berlin.
- [9] M. Hijikata, R. Miyagusuku, K. Ozaki (2022) *Wheel Arrangement of Four Omni Wheel Mobile Robot for Compactness*. Applied Sciences.
- [10] H. Taheri, C. X. Zhao (2020) *Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches*. Mechanism and Machine Theory.
- [11] D. Wang, W. Wei, Y. Yeboah, Y. Li, Y. Gao (2020) *A robust model predictive control strategy for trajectory tracking of omni-directional mobile robots*. Journal of Intelligent & Robotic Systems.
- [12] Khanh Ly Trinh Thi, Hong Thai Nguyen (2022) *Path tracking control for car-like robots by PID controller with time-varying parameters*. VNUHCM Journal of Engineering and Technology.
- [13] Nguyen Hong Thai, et al. (2022) *Trajectory tracking control of AGV mobile robot by time-varying parameter PID controller*. National Conference on Dynamics and Control, Hanoi University of Science and Technology.
- [14] Trinh Thi Khanh Ly, et al. (2023) *Dynamic Simulation of Differential-Driven Mobile Robot Taking into Account the Friction Between the Wheel and the Road Surface*. International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development.
- [15] M. Mizzone, P. van Goor, A. Franchi (2024) *Unified Feedback Linearization for Nonlinear Systems With Dexterous and Energy-Saving Modes*. IEEE Control Systems Letters, vol. 8, pp. 3494–3499.
- [16] M. T. Watson, D. T. Gladwin, T. J. Prescott (2021) *Collinear Mecanum Drive: Modeling, Analysis, Partial Feedback Linearization, and Non-linear Control*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 37, no. 2, pp. 642–658, doi: 10.1109/TRO.2020.2977878.
- [17] P. S. Yadav, V. Agrawal, J. C. Mohanta, M. F. Ahmed (2022) *A robust sliding mode control of mecanum wheel-chair for trajectory tracking*. Materials Today: Proceedings.
- [18] R. Zhang, H. Hu, Y. Fu (2019) *Trajectory tracking for omnidirectional mecanum robot with longitudinal slipping*. MATEC Web of Conferences.
- [19] M. Swadi, M. A. Tawfik, E. N. Abdulwahab, A. H. Almotir-Kadhim (2016) *Fuzzy Backstepping controller based on optimization method for trajectory tracking of wheeled mobile robot*. UKSim-AMSS 18th Int. Conf. Comput. Model. Simulation, pp. 147–152.
- [20] M. Jiang, L. Chen, Y. Wang, H. Wu (2022) *Adaptive Backstepping Control for Mecanum-Wheeled Omnidirectional Vehicle Using Neural Networks*. Wylei, vol. 17, no. 3, pp. 378–386.
- [21] Islam, Z.U., Chiddarwar, S.S., Sahoo, S.R. (2022) *Design of Robust Backstepping Controller for Four-Wheeled Mecanum Mobile Robot*. In: Kumar, R., Chauhan, V.S., Talha, M., Pathak, H. (eds) Machines, Mechanism and Robotics. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-16-0550-5\_107.
- [22] Alakshendra, V., Chiddarwar, S.S. (2017) *Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties*. Nonlinear Dyn 87, 2147–2169. doi: 10.1007/s11071-016-3179-1.
- [23] V. Alakshendra, S. S. Chiddarwar (2016) *A robust adaptive control of mecanum wheel mobile robot: simulation and experimental validation*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5606–5611. doi: 10.1109/IROS.2016.7759824.
- [24] X. Lu, X. Zhang, G. Zhang, S. Jia (2018) *Design of Adaptive Sliding Mode Controller for Four-Mecanum Wheel Mobile Robot*. Chinese Control Conference (CCC), pp. 3983–3987. doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483388.
- [25] M. Szeremeta, A. Szuster (2022) *Neural Tracking Control of a Four-Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels*. Applied Sciences, vol. 12, no. 11.
- [26] D. Zhang, G. Wang, Z. Wu (2024) *Reinforcement Learning-Based Tracking Control for a Three Mecanum Wheeled Mobile Robot*. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 35, no. 1, pp. 1445–1452. doi: 10.1109/TNNLS.2022.3185055.
- [27] F. Pourboghra, A. M. P. Karlsson (2002) *Adaptive control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints*. Comput. Electr. Eng., vol. 28, no. 4, pp. 241–253.
- [28] S. J. Yoo (2010) *Adaptive tracking control for a class of wheeled mobile robots with unknown skidding and slipping*. IET Control Theory Appl, vol. 4, no. 10, pp. 2109–2119.
- [29] S. J. Yoo (2011) *Adaptive tracking and obstacle avoidance for a class of mobile robots in the presence of unknown skidding and slipping*. IET Control Theory Appl, vol. 5, no. 14, pp. 1597–1608.
- [30] S. Li, L. Ding, H. Gao, C. Chen, Z. Liu, Z. Deng (2018) *Adaptive neural network tracking control-based reinforcement learning for wheeled mobile robots with skidding and slipping*. Neurocomputing, vol. 283, pp. 20–30.
- [31] T. Zhao, X. Zou, S. Dian (2022) *Fixed-time observer-based adaptive fuzzy tracking control for Mecanum-wheel mobile robots with guaranteed transient performance*. Nonlinear Dyn 107, 921–937. doi: 10.1007/s11071-021-06985-0.
- [32] T. T. Thuong, V. T. Ha, V. Q. Vinh, N. T. Hien (2024) *Design Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Controller Combined with DWA Algorithm in Motion Control for Mecanum Wheels Omnidirectional Mobile Robots*. Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 943. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-031-62238-0\_36.
- [33] V.-P. Vu, V.-H. Hoang, H.-T. Vu, and V.-T. Tran (2023) *Decentralized collaboration control and obstacle avoidance for swarm robot*. Measurement, Control, and Automation, vol. 4, no. 1, pp. 69–80.
- [34] H. H. Bui, V. H. Dang, T. T. Nguyen, K. A. Nguyen, K. Q. Nguyen, and V. Q. B. Ngo (2022) *Applying image processing technology for automatic mobile robot tracking and following steel weld seams*. Measurement, Control, and Automation, vol. 3, no. 3, pp. 26–32.