

Xây dựng bộ điều khiển mặt trượt động điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành đa hướng bốn bánh Mecanum

Nguyễn Minh Đông^{1*}, Ngô Mạnh Tiến^{2*}, Đỗ Quang Hiệp¹,
Bùi Văn Bắc³, Chu Văn Vương³, Nguyễn Đức Thắng³

¹Trường ĐH Kinh tế Kỹ thuật Công nghiệp (454 Minh Khai, Hai Bà Trưng, Hà Nội);

²Viện Vật lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội);

³Trường ĐH Bách Khoa Hà Nội (1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội).

*Email: nmdong@uneti.edu.vn; nm tien@iop.vast.vn

Nhận bài: 24/8/2022; Hoàn thiện: 10/11/2022; Chấp nhận đăng: 28/11/2022; Xuất bản: 23/12/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2022.41-49>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày xây dựng thuật toán điều khiển mặt trượt động (DSC) áp dụng cho đối tượng Robot tự hành đa hướng bốn bánh Mecanum (FMWR). Trong bài báo chúng tôi xây dựng mô hình toán học gồm: phương trình động học và động lực học cho FMWR dựa trên phương trình Lagrange, từ đó, đề xuất thuật toán điều khiển mặt trượt động cho FMWR. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh theo Lyapunov. Các kết quả mô phỏng với thuật toán DSC đề xuất so với các bộ điều khiển PID, Điều khiển trượt (SMC) cho thấy tính kháng nhiễu và chất lượng điều khiển tốt hơn.

Từ khóa: Robot tự hành; Bánh xe mecanum; Điều khiển trượt; Điều khiển mặt trượt động.

1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, Robot tự hành được nhiều sự quan tâm nghiên cứu của cộng đồng khoa học bởi nó được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp và trong đời sống, Robot có thể di chuyển tự động linh hoạt trong một phạm vi nhất định và thực hiện những tác vụ định trước thay thế vai trò của con người. Bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành rất quan trọng, ngoài các hướng nghiên cứu nâng cao chất lượng điều khiển thì việc thay đổi cơ cấu truyền động cơ khí giúp robot di chuyển linh hoạt cũng được tập trung. Trước đây, Robot tự hành dạng non-holonomic dạng 2 bánh chủ động [18] được sử dụng tiêu biểu là AGV (Automation Guided Vehicle) đã xuất hiện nhiều trong công nghiệp. Loại robot này thông thường chỉ xét đến 2 bậc tự do điều khiển được là bậc tự do theo phương di chuyển tịnh tiến theo phương dọc và di chuyển theo góc. Ngược lại robot tự hành dạng holonomic xét đến đầy đủ cả 3 phương di chuyển, do đó, nó tăng tính linh hoạt trong chuyển động của robot. Đặc biệt, robot có thể di chuyển tức thời theo bất cứ phương nào mà không phụ thuộc vào góc quay. Robot tự hành sử dụng bánh đa hướng có thêm các ưu điểm vượt trội như: khả năng thay đổi vị trí và định hướng linh hoạt bởi chúng có khả năng tịnh tiến và quay đồng thời hoặc độc lập, tiêu biểu cho loại robot đa hướng này là sử dụng bánh xe loại Omni. Gần đây, robot tự hành đa hướng cũng được cải tiến theo hướng tăng khả năng cơ động, cũng như tải trọng nhằm mục đích hướng đến các ứng dụng cụ thể yêu cầu, trong đó có hướng thay đổi cấu trúc bánh xe Omni sang sử dụng bánh xe Mecanum.

Bánh xe Mecanum được thiết kế với các con lăn vệ tinh lệch một góc 45° so với trục chính bánh xe [17]. Robot mecanum được cấu tạo với bốn bánh xe mecanum được dẫn động độc lập bởi bốn động cơ riêng biệt, nhờ vào thiết kế robot và bánh xe như vậy nên FMWR có thể di chuyển linh hoạt đa hướng. So với robot đa hướng sử dụng bánh xe Omni [19, 20] có cùng kích thước thì bánh xe Mecanum có khả năng chịu tải trọng lớn hơn vậy nên được dùng trong công nghiệp, lưu trữ và vận chuyển,... Vì những ưu điểm và ứng dụng rộng rãi nêu trên, nhóm nghiên cứu chúng tôi đã xây dựng mô phỏng và so sánh các thuật toán điều khiển bám quỹ đạo cho robot Mecanum.

Những nghiên cứu trước đây đã giải quyết bài toán động học thuận, động học ngược của

FMWR trên nền tảng hệ quy chiếu cố định [13, 15] và trong mối quan hệ với hệ tọa độ chuyển động [12, 14]. Bên cạnh đó có một số công trình nghiên cứu động lực học cho FMWR [8, 13, 16] bằng tổng động năng của hệ và áp dụng vào phương trình Lagrange [6, 10, 11].

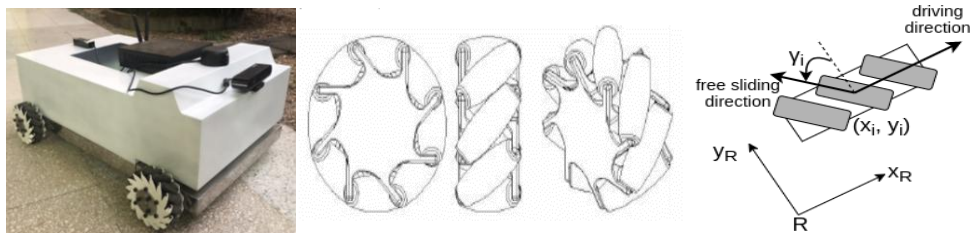
Trước đây, các thuật toán được sử dụng trong điều khiển chuyển động cho FMWR chủ yếu bao gồm điều khiển PID thông thường và điều khiển PID mờ [4, 5]. Tuy nhiên, có một số các nghiên cứu đã bỏ qua động lực học của FMWR [3]. Một số công trình sử dụng bộ điều khiển SMC là một phương pháp điều khiển đơn giản và hiệu quả. Nhưng phương pháp này cũng gặp nhược điểm lớn là xảy ra hiện tượng rung (chattering) khiến cho hệ thống mất đi tính ổn định. Điều khiển Backstepping cũng đã được đề xuất trong điều khiển robot di động holonomic thể hiện trong [7, 9]. Tuy nhiên, bộ điều khiển Backstepping tồn tại sự ảnh hưởng của nhiễu. Để khắc phục các nhược điểm trên, nhóm nghiên cứu đề xuất thuật toán DSC [1, 2] vào điều khiển bám quỹ đạo cho FMWR để khắc phục hiện tượng (chattering), thích nghi được với các tham số thay đổi của mô hình, các kết quả nghiên cứu cho thấy DSC có khả năng kháng nhiễu tốt. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh theo Lyapunov.

2. MÔ HÌNH HÓA ROBOT TỰ HÀNH ĐA HƯỚNG BỐN BÁNH MECANUM

2.1. Bánh xe Mecanum

Bánh xe Mecanum được thiết kế với các con lăn vệ tinh được đặt lệch với trục bánh xe một góc 45° . Khi động cơ truyền động cho bánh xe chạy theo phương vuông góc với trục truyền động đồng thời các con lăn của bánh xe chuyển động biến đổi một phần lực thành lực trượt của mỗi bánh xe, các lực đó giúp đảm bảo cho Robot có thể di chuyển theo bất kỳ hướng nào.

Mô hình bánh xe Mecanum được biểu diễn trong hình 1.



Hình 1. Bánh xe Mecanum.

Tốc độ dẫn động của bánh xe được tính theo công thức dưới đây:

$$\omega_i = \frac{1}{r} [1 \quad \tan \gamma] \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_i \\ 0 & 1 & x_i \end{bmatrix} \mathbf{v} = \mathbf{h}_i \mathbf{v} \quad (1)$$

Trong đó:

- r : Bán kính bánh xe;
- \mathbf{v} : Vận tốc robot $(v_x, v_y, \omega)^T \quad \mathbf{h}_i \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$
- γ : Góc giữa con lăn vệ tinh và trục chính bánh xe.

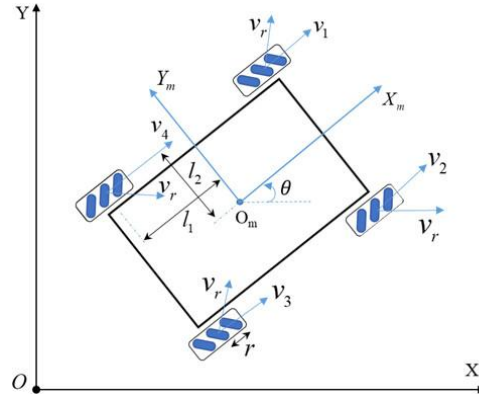
2.2. Mô hình toán học của FMWR

Mô hình Robot được sử dụng 4 bánh xe Mecanum được dẫn động độc lập bởi 4 động cơ riêng biệt. Cách sắp xếp vị trí mỗi bánh xe được thực hiện như trên hình 2.

Trong đó:

- OXY là khung tọa độ cơ sở, $O_m X_m Y_m$ là khung tọa độ của robot, góc hướng θ ;
- v_i : Vận tốc của các bánh xe (m/s);
- v_r : Vận tốc con lăn bị động (m/s);

- r : Bán kính bánh xe (m), góc giữa (v_i, v_r) là $\pi/4$;
- I : Mô men quán tính của robot $(kg.m^2)$;
- I_b : Mô men quán tính bánh xe $(kg.m^2)$;
- l_1, l_2 là khoảng cách từ trục $O_m Y_m$ và trục $O_m X_m$ đến bánh xe.



Hình 2. Mô hình Robot đa hướng bốn bánh Mecanum.

2.2.1. Phương trình động học

Vận tốc của bánh xe theo hướng X_m và Y_m của khung tọa độ robot:

Với $\omega_i = v_i / r$, ta có:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & -(l_1 + l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Để tính toán động học ngược trong hệ tọa độ toàn cục, ma trận phép quay của tọa độ cục bộ và tọa độ toàn cục liên quan đến hướng là:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = Rot(z, \theta) \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Từ đó, ta được phương trình động học cho FMWR:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.2. Phương trình động lực học

Theo [6], [10] và [13] tổng động năng quay và động năng tịnh tiến của hệ là:

$$E = \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (5)$$

Do hệ di chuyển trên mặt đất nên thế năng trọng trường của hệ $T=0$. Tổng động năng và thế năng của hệ là:

$$L = E + T = E \quad (6)$$

$$L = \frac{1}{2} \left(m \frac{r^2}{8} + I \frac{r^2}{16(l_1 + l_2)^2} + I_b \right) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) + \left(\frac{mr^2}{8} - \frac{I_r^2}{16(l_1 + l_2)^2} \right) (\omega_1 \omega_3 + \omega_2 \omega_4) - \frac{I_r^2}{16(l_1 + l_2)^2} (\omega_1 \omega_2 - \omega_1 \omega_4 - \omega_2 \omega_3 + \omega_3 \omega_4) \quad (7)$$

Theo công thức Lagrange: $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_i} = Q_i$ (8)

Trong đó: $\phi_i = \omega_i$ và Q_i là lực tác động của các bánh xe thứ i

$$\begin{aligned} \left(m + \frac{4I_b}{r^2} \right) (\ddot{x} + \dot{y}\dot{\theta}) &= \frac{1}{r} [(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \cos \theta - (-Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4) \sin \theta] \\ \left(m + \frac{4I_b}{r^2} \right) (\ddot{y} + \dot{x}\dot{\theta}) &= \frac{1}{r} [(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \sin \theta + (-Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4) \cos \theta] \\ \left(I + \frac{4I_b(l_1 + l_2)^2}{r^2} \right) \ddot{\theta} &= \frac{l_1 + l_2}{r} (-Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4) \end{aligned} \quad (9)$$

Kết hợp ta xác định được phương trình động lực học dạng như sau:

$$M\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + B\xi = B\tau \quad (10)$$

Trong đó:

- τ_i là mô men được cấp bởi tín hiệu điều khiển
- μ là hệ số ma sát
- N_i phản lực tác dụng lên hệ $N_i = P/4 = \frac{mg}{4}$

$$M = \begin{bmatrix} m + \frac{4I_b}{r^2} & 0 & 0 \\ 0 & m + \frac{4I_b}{r^2} & 0 \\ 0 & 0 & I + \frac{4I_b(l_1 + l_2)^2}{r^2} \end{bmatrix}; C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} \left(m + \frac{4I_b}{r^2} \right) \dot{y}\dot{\theta} \\ - \left(m + \frac{4I_b}{r^2} \right) \dot{x}\dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix}; \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta + \sin \theta & \cos \theta - \sin \theta & \cos \theta + \sin \theta & \cos \theta - \sin \theta \\ -\cos \theta + \sin \theta & \cos \theta + \sin \theta & -\cos \theta + \sin \theta & \cos \theta + \sin \theta \\ -(l_1 + l_2) & l_1 + l_2 & l_1 + l_2 & -(l_1 + l_2) \end{bmatrix}; \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}; \xi = \begin{bmatrix} \mu r N_1 \operatorname{sgn}(\omega_1) \\ \mu r N_2 \operatorname{sgn}(\omega_2) \\ \mu r N_3 \operatorname{sgn}(\omega_3) \\ \mu r N_4 \operatorname{sgn}(\omega_4) \end{bmatrix}$$

3. THIẾT KẾ CÁC THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN CHO FMWR

3.1. Bộ điều khiển trượt

Hiện tại, đã có nhiều công trình ứng dụng thuật toán điều khiển kinh điển PID [3-5] để điều khiển bám quỹ đạo cho FMWR. Trong phần này, chúng tôi thiết kế bộ điều khiển SMC để làm căn cứ để so sánh với bộ điều khiển DSC đề xuất. Các bước thiết kế luật điều khiển như sau:

$$\text{Đặt: } \begin{cases} x_1 = q \\ \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{q} = u + f(x) \end{cases} \quad (11)$$

Chọn mặt trượt: $S = \lambda e + \dot{e}$ với $\lambda > 0$

Trong đó: $e = x_1 - x_{1d}$

Đạo hàm S kết hợp với (11) ta thu được:

$$\dot{S} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} = \lambda \dot{e} + M^{-1}[B(\tau - \xi) - C] - \ddot{x}_{1d} \quad (12)$$

Chọn hàm: $V = \frac{1}{2} S^T S$

Đạo hàm hàm V kết hợp với (18) ta được:

$$\dot{V} = S^T \dot{S} = S^T \{ \lambda \dot{e} + M^{-1}[B(\tau - \xi) - C] - \ddot{x}_{1d} \} \quad (13)$$

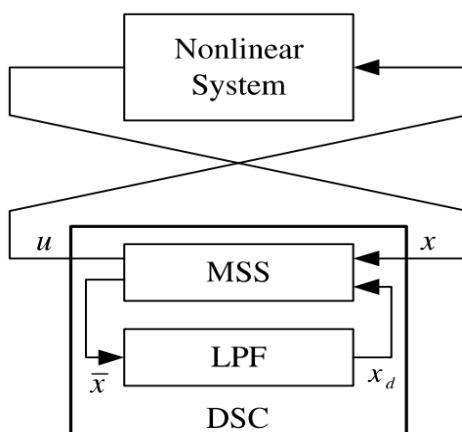
Chọn tín hiệu điều khiển:

$$\tau = -B^T (BB^T)^{-1} [M(\lambda \dot{e} - \ddot{x}_{1d} + k_1 \text{sgn}(S)) - C - B\xi] \quad (14)$$

Thay vào (13) thu được: $\dot{V} = -k_1 S^T \text{sgn}(S) \leq 0$ với k_1 là hằng số dương thì hệ ổn định theo Lyapunov.

3.2. Bộ điều khiển mặt trượt động (DSC)

Bộ điều khiển mặt trượt động [1] gồm 2 khối: Khối đa mặt trượt (MSS) và khối lọc thông thấp (LPF). Khối đa mặt trượt tính toán trạng thái dựa trên trạng thái của hệ thống và tín hiệu lọc. Các giá trị được đưa vào bộ lọc và giá trị ra tương ứng quay trở lại khối đa mặt trượt.



Hình 3. Cấu trúc của bộ điều khiển DSC.

Xét mặt trượt: $S_1 = x_1 - x_{1d}$

Đạo hàm S_1 ta có: $\dot{S}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = x_2 - \dot{x}_{1d}$

Chọn: $\bar{x}_2 = \dot{x}_{1d} - K_1 S_1$

Tín hiệu điều khiển ảo x_{2d} được bám theo \bar{x}_2 qua một bộ lọc là khâu quán tính bậc nhất:

$$\tau \dot{x}_{2d} + x_{2d} = \bar{x}_2, \quad x_{2d}(0) = \bar{x}_2(0) \quad (15)$$

Chọn mặt trượt: $S_2 = x_2 - x_{2d}$

Đạo hàm S_2 ta có: $\dot{S}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = u + f(x) - \dot{x}_{2d}$; Trong đó đặt: $u = M^{-1} B \tau, f(x) = -M^{-1}(C - B\xi)$

Kết hợp với (15) chọn: $u = \dot{x}_{2d} - f(x) - K_2 S_2 = \frac{\bar{x}_2 - x_{2d}}{\tau} - f(x) - K_2 S_2$

Với cấu trúc của hệ thống DSC đã thiết kế, tín hiệu điều khiển:

$$\tau = -B^T (BB^T)^{-1} [M(-\frac{\bar{x}_2 - x_{2d}}{\tau} + k_2 S_2) - C - B\xi] \quad (16)$$

Suy ra: $\dot{S}_2 = -K_2 S_2$

Ta có: $\dot{x}_1 = x_2 = \bar{x}_2 + (x_2 - x_{2d}) + (x_{2d} - \bar{x}_2)$

Đặt $\chi_2 = x_{2d} - \bar{x}_2$

Kết hợp với \dot{S}_1, S_2 ở trên và việc chọn \bar{x}_2 ta có thể viết lại được:

$$\dot{S}_1 = -K_1 S_1 + S_2 + \chi_2 \quad (17)$$

Ta có: $\dot{\chi}_2 = \dot{x}_{2d} - \dot{\bar{x}}_2 = -\frac{\chi_2}{\tau} - \ddot{x}_{1d} + K_1 \dot{S}_1 = -\frac{\chi_2}{\tau} + \eta_2(S_1, S_2, \chi_2, x_{1d}, \dot{x}_{1d}, \ddot{x}_{1d})$

Chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{S_1^T S_1 + S_2^T S_2 + \chi_2^T \chi_2}{2} \quad (18)$$

Suy ra: $\dot{V} = S_1^T \dot{S}_1 + S_2^T \dot{S}_2 + \chi_2^T \dot{\chi}_2 = S_1^T (-K_1 S_1 + S_2 + \chi_2) + S_2^T (-K_2 S_2) + \chi_2^T (-\frac{\chi_2}{\tau} + \eta_2)$

Sử dụng các bất đẳng thức:

$$S_1^T S_2 \leq \frac{S_1^T S_1 + S_2^T S_2}{2}; S_1^T \chi_2 \leq \frac{S_1^T S_1 + \chi_2^T \chi_2}{2}; \chi_2^T \eta_2 \leq \frac{3(\chi_2^T \chi_2)(\eta_2^T \eta_2)}{2} + \frac{\varepsilon}{3} \quad (19)$$

Suy ra:

$$\dot{V} \leq \frac{2S_1^T S_1 + S_2^T S_2 + \chi_2^T \chi_2}{2} - (K_1 S_1^T S_1 + K_2 S_2^T S_2) + \varepsilon + (-\frac{\chi_2^T \chi_2}{\tau} + \frac{3(\chi_2^T \chi_2)(\eta_2^T \eta_2)}{2}) \quad (20)$$

Xét miền: $B = \{z \in \mathbb{R}^9 | S_1^T S_1 + S_2^T S_2 + \chi_2^T \chi_2 \leq 2p, p > 0, z = [S_1^T \ S_2^T \ \chi_2^T]^T\}$ là một miền bị chặn. Vì các hàm η_2 sẽ tồn tại giá trị lớn nhất trên miền B, gọi giá trị lớn nhất trên B là M.

Chọn: $K_1 = K_2 = 2 + K, \frac{1}{\tau} = 1 + \frac{M^2}{2\varepsilon} + K$

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \frac{2S_1^T S_1 + S_2^T S_2 + \chi_2^T \chi_2}{2} - (2 + K)(S_1^T S_1 + S_2^T S_2) + \varepsilon + [-\chi_2^T \chi_2 (1 + \frac{M^2}{2\varepsilon} + K) + \frac{M^2(\chi_2^T \chi_2)(\eta_2^T \eta_2)}{2\varepsilon}] \\ &\leq -2KV + \varepsilon - (1 - \frac{\eta_2^T \eta_2}{M^2}) \frac{M^2(\chi_2^T \chi_2)}{2\varepsilon} \end{aligned} \quad (21)$$

Cuối cùng ta thu được $\dot{V} \leq -2KV + \varepsilon$ trên B và với hằng số dương $\eta_2 \leq M$ trên B

Ta có thể thấy rằng, $\dot{V} < 0$ nếu $V > \varepsilon / 2K$, khi $\dot{V} \geq 0$ thì $V \leq \varepsilon / 2K$. Do hằng số ε có thể chọn nhỏ tùy ý muốn nên vậy các sai số của hệ thống luôn có thể được giới hạn ở mức cho phép.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Các tham số mô phỏng:

$$m = 20 \text{ kg}; I = 5 \text{ kg.m}^2; I_b = 0.1 \text{ kg.m}^2; l_1 = l_2 = 0.3 \text{ m}; r = 0.075 \text{ m}; g = 9.8 \text{ m/s}^2; \mu = 0.01$$

Bộ điều khiển PID [3]: $K_p = \text{diag}(900, 900, 900)$; $K_I = \text{diag}(850, 850, 850)$

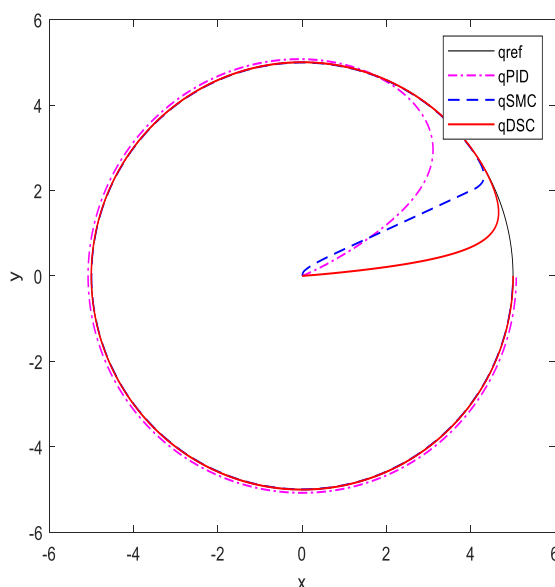
Bộ điều khiển trượt: $\lambda = \text{diag}(10, 10, 10)$; $k_1 = \text{diag}(50, 50, 50)$

Bộ điều khiển mặt trượt động: $K_1 = \text{diag}(5, 5, 5)$; $K_2 = \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01)$; $\tau = 0.01$

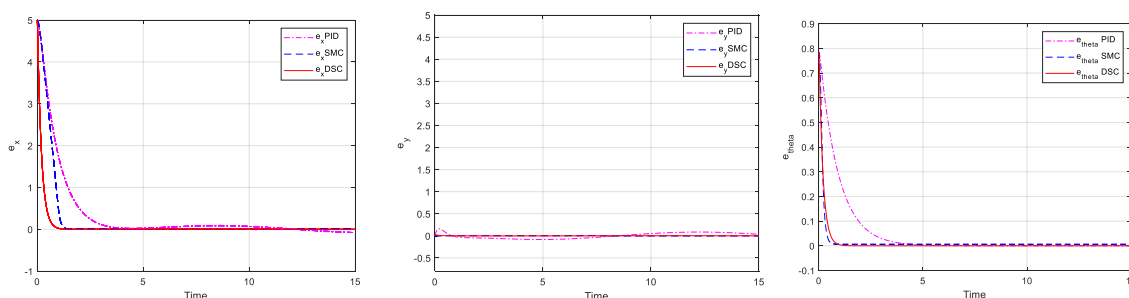
$$\text{Trường hợp quỹ đạo là đường tròn: } \begin{cases} X_r = R_0 \cos \omega t \\ Y_r = R_0 \sin \omega t \\ \theta_r = \pi / 4 \end{cases} \text{ với } R_0 = 5, \omega = \frac{2\pi}{15}$$

Kết quả mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink

- Khi bộ tham số của FMWR là: $m = 20 \text{ kg}$; $I = 5 \text{ kg.m}^2$; $I_b = 0.1 \text{ kg.m}^2$



Hình 4. Các quỹ đạo của FMWR khi sử dụng các thuật toán PID, SMC và DSC.

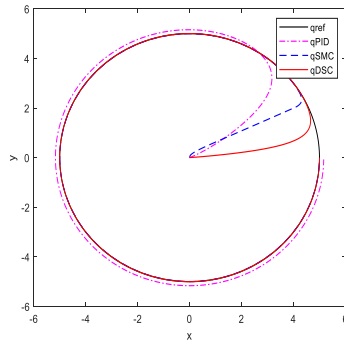


Hình 5. Sai số quỹ đạo của FMWR theo phương x, y và góc hướng.

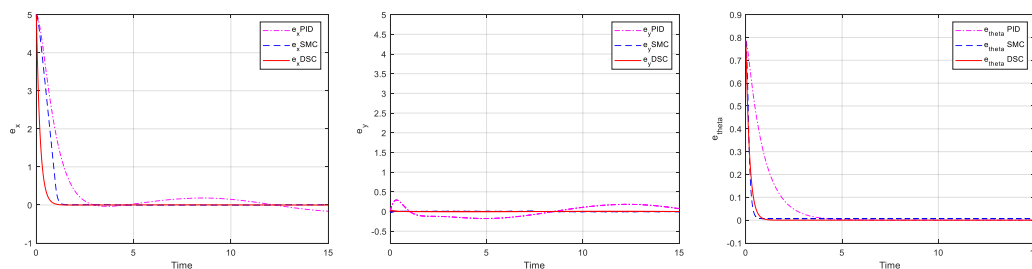
Kết quả phỏng với thuật toán điều khiển DSC thì robot di chuyển bám quỹ đạo đặt trong thời gian ngắn với sai lệch bám được triệt tiêu nhỏ nhất.

So sánh kết quả mô phỏng với các thuật toán điều khiển PID, SMC thì thuật toán DSC có chất lượng điều khiển tốt hơn, thời gian quá độ trong khoảng dưới 1s, sai lệch nhỏ, giảm mạnh hiện tượng “chattering”

- Khi thay đổi tham số của robot với các giá trị: $m = 50 \text{ kg}$; $I = 10 \text{ kg.m}^2$; $I_b = 0.2 \text{ kg.m}^2$



Hình 6. Các quỹ đạo của FMWR khi sử dụng các thuật toán PID, SMC và DSC khi robot có các tham số thay đổi.



Hình 7. Sai số quỹ đạo của FMWR khi robot có các tham số thay đổi.

Dựa vào kết quả mô phỏng cho thấy, khi Robot có các tham số khối lượng, momen quán tính thay đổi thì bộ điều khiển PID có hiện tượng mất ổn định, tồn tại sai lệch tĩnh lớn hơn, bộ điều khiển MSC & DSC vẫn hoạt động ổn định bám quỹ đạo với thời gian quá độ trong khoảng dưới 1s, sai lệch nhỏ, nhưng chất lượng điều khiển của DSC tốt hơn với sai lệch nhỏ, giảm mạnh hiện tượng “chattering”.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo đã xây dựng phương trình động học và động lực học cho FMWR. Đề xuất thuật toán điều khiển mặt trượt động, chứng minh tính ổn định của hệ thống theo tiêu chuẩn Lyapunov. Các kết quả mô phỏng với thuật toán DSC cho thấy, robot bám quỹ đạo đạt với thời gian đáp ứng nhanh, sai lệch nhỏ, khi thay đổi thông số đầu vào hệ thống vẫn hoạt động ổn định. So sánh với bộ điều khiển truyền thống PID và SMC cho thấy DSC có chất lượng điều khiển tốt hơn. Từ những kết quả đạt được nhóm tác giả sẽ nghiên cứu đưa thuật toán DSC vào mô hình FMWR thực nghiệm và đánh giá kết quả.

Lời cảm ơn: Bài báo này được sự tài trợ bởi Đề tài KHCN cấp Quốc gia: “Nghiên cứu phát triển robot tự hành thông minh sử dụng các công nghệ sensor khác nhau và nền tảng IoT, AI, định hướng ứng dụng trong quan trắc môi trường phóng xạ” thuộc chương trình phát triển Vật lý giai đoạn 2021-2025, mã số: ĐTDLCL.19/23.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. Swaroop, J. K. Hedrick, P. P. Yip, and J. C. Gerdes “Dynamic Surface Control for a Class of Nonlinear Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 45, No. 10 (2000).
- [2]. Bongsob Song, Adam Howell, and Karl Hedrick, “Dynamic Surface Control Design for a Class of Nonlinear Systems”, Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control Orlando, Florida USA (2001).
- [3]. Ching-Chih Tsai, Li-Bin Jiang, Tai-Yu Wang, Tung-Sheng Wang, “Kinematics Control of an Omnidirectional Mobile Robot”, Proceedings of 2005 CACS Automatic Control Conference Tainan, Taiwan (2005).

- [4]. Bruce, J. R., “Real-time motion planning and safe navigation in dynamic multi-robot environments,” Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa School of Computer Science (2006).
- [5]. Purwin, O., & D’Andrea, R., “Trajectory generation and control for four wheeled omnidirectional vehicles,” Robotics and Autonomous Systems, Vol. 54, No 1, pp.13-22, (2006).
- [6]. Nkgatho Tlale, Mark de Villiers “Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform”, 15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice , 2-4 Dec 2008, Auckland, New-Zealand, (2008).
- [7]. Tai-Yu Wang, Ching-Chih Tsai, Der-An Wang, “Dynamic Control of An Omnidirectional Mobile Platform”, Journal of Nan Kai, Vol. 7, No. 1, pp.9-18, (2010).
- [8]. Becker, F.; Bondarev, O.; Zeidis, I.; Zimmermann, K.; Abdelrahman, M.; Adamov, B. “An approach to the kinematics and dynamics of a four-wheel Mecanum vehicle” Scientific Journal Of IFToMM “Problems Of Mechanics” No. 2(55), pp.27–37, (2014).
- [9]. J. Wang, J. Chen, S. Ouyang, Y. Yang, “Trajectory tracking control based on adaptive neural dynamics for four-wheel drive omni-directional mobile robots”, Engineering Review, Vol. 34, No. 3, pp.235-243, (2014).
- [10]. Klaus Zimmermann, Igor Zeidis, and Mohamed Abdelrahman “Dynamics of Mechanical Systems with Mecanum Wheels”, Applied Non-Linear Dynamical Systems, pp.269–279, (2014).
- [11]. Bongsob Song, J. Karl Hedrick, and Yeonsik Kang “Dynamic Surface Control and Its Application to Lateral Vehicle Control”, Mathematical Problems in Engineering, pp.1-10, (2014).
- [12]. Hamid Taheri, Bing Qiao, Nurallah Ghaeminezhad “Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Vol. 113, No. 3 (2015).
- [13]. Z. Hendzel and L. Rykała “Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with Mecanum wheels with the use of lagrange equations of the second kind” Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, Vol.22, No. 1, pp.81-99, (2017).
- [14]. Li, Y.; Dai, S.; Zheng, Y.; Tian, F.; Yan, X. “Modeling and kinematics simulation of a Mecanum wheel platform in RecurDyn” Journal of Robotics (2018).
- [15]. Hendzel, Z. “A Description of the Motion of a Mobile Robot with Mecanum Wheels–Kinematics” in proceedings of the Conference on Automation, Warsaw, Poland, 27–29 March 2019; pp. 346–355.
- [16]. Zeidis, I.; Zimmermann, K. “Dynamics of a four wheeled mobile robot with Mecanum wheels” J. Appl. Math. Mech. Z. Angew Math. Mech (2019).
- [17]. Abd Mutalib, M.A.; Azlan, N.Z. “Prototype development of Mecanum wheels mobile robot” Applied Research and Smart Technology Vol. 1, No. 2 (2020).
- [18]. Trần Thuận Hoàng và cộng sự, “Robot di động đa cảm biến và định vị robot bằng phương pháp tổng hợp cảm biến với bộ lọc Kalman mở rộng”, Hội thảo toàn quốc về Điện tử - Truyền thông – An toàn thông tin, ATC/REV, (2012).
- [19]. Hà Thị Kim Duyên, “Điều khiển mặt động thích nghi bám quỹ đạo cho Robot tự hành bốn bánh đa hướng, Luận án tiến sĩ”, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam, (2020).
- [20]. Đỗ Nam Thắng, “Nghiên cứu tổng hợp điều khiển thông minh cho robot tự hành trong môi trường bất định”, Luận án tiến sĩ, Viện KH& CN Quân Sự, (2021).

ABSTRACT

Research dynamic surface control for four Mecanum wheeled mobile robot

The manuscript presents the Dynamic Surface Control (DSC) applied to the Four Mecanum Wheeled Mobile Robot (FMWR). The mathematical model in this manuscript has been built, including Kinematic and dynamic equations for FMWR based on the Euler-Lagrange equations. Propose a dynamic sliding surface control algorithm for FMWR. The stability of the system is proven by Lyapunov stability theory. The simulation results with the proposed DSC algorithm compared with the PID and SMC controllers show better control efficiency and quality.

Keywords: Mobile robot; Four Mecanum Wheeled Mobile Robot; Sliding mode control; Dynamic Surface Control.