

PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE SLIDING MODE CONTROL FOR AN OMNI-DIRECTIONAL MOBILE ROBOT

Tran Thi Thuy Trang, Pham Thanh Tung*

Vinh Long University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 16/01/2022	A proportional integral derivative sliding mode control (PID-SMC) for an Omni-directional mobile robot is designed and evaluated in this article. This is one type of mobile robot that is the most widely used in industrial automation systems with many advantages, such as flexibility in movement patterns, have the ability to move freely in both directions. The PID-SMC is designed to ensure the robot's actual trajectory tracks to the reference in a finite time and reduces the chattering phenomenon around the sliding surface. The stability of the system is proved using the Lyapunov stability theory. Simulation results in MATLAB/Simulink show the effectiveness of the proposed controller with the overshoot, the rising time, the settling time of x_w is 1.963(%), $0.045 \pm 0.001(s)$, 0.28(s) and y_w is 0.505(%), $0.160 \pm 0.001(s)$, 0.231(s), the steady state error converges to zero and the chattering is reduced.
Revised: 25/4/2022	
Published: 26/4/2022	
KEYWORDS	
Sliding mode control	
PID	
Omni-directional mobile robot	
Chattering	
MATLAB/Simulink	

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT PID ROBOT DI ĐỘNG ĐA HƯỚNG

Trần Thị Thùy Trang, Phạm Thanh Tùng*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 16/01/2022	Bộ điều khiển trượt vi tích phân tỷ lệ cho robot di động đa hướng được thiết kế và đánh giá trong bài báo này. Đây là loại robot được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống tự động hóa công nghiệp với nhiều ưu điểm như linh hoạt trong các mô hình chuyển động, có khả năng di chuyển tự do theo các hướng. Bộ điều khiển trượt vi tích phân tỷ lệ được thiết kế đảm bảo quỹ đạo thực tế của robot hội tụ về quỹ đạo mong muốn trong thời gian hữu hạn và giảm hiện tượng chattering quanh mặt trượt. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh dựa vào lý thuyết ổn định Lyapunov. Các kết quả mô phỏng với MATLAB/Simulink cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất với độ vọt lố, thời gian tăng, thời gian xác lập của x_w là 1,963(%), $0,045 \pm 0,001(s)$, 0,28(s) và của y_w là 0,505(%), $0,160 \pm 0,001(s)$, 0,231(s), sai số xác lập hội tụ về 0 và giảm hiện tượng chattering.
Ngày hoàn thiện: 25/4/2022	
Ngày đăng: 26/4/2022	
TỪ KHÓA	
Điều khiển trượt	
Vi tích phân tỷ lệ	
Robot di động đa hướng	
Chattering	
MATLAB/Simulink	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5460>

* Corresponding author. Email: tungpt@vlute.edu.vn

1. Giới thiệu

Tự động hóa công nghiệp là điều kiện tiên quyết đối với sản xuất thông minh và robot di động đại diện cho một phần cốt lõi của hệ thống tự động hóa công nghiệp. Trong những thập kỷ gần đây, do các ứng dụng rộng rãi của robot di động, các bài toán trọng tâm trong điều khiển chuyển động của robot di động bao gồm: ổn định điểm, bám đường đi và quỹ đạo đã thu hút sự quan tâm đáng kể từ các nhà nghiên cứu [1]. Robot di chuyển bằng bánh xe có nhiều ưu điểm hơn so với các robot di chuyển bằng chân như cấu trúc đơn giản, tiết kiệm năng lượng, tốc độ di chuyển cao và chi phí thấp [2]. Một loại robot di động được sử dụng rộng rãi nhất là robot ba bánh Omni, còn được gọi là robot di động đa hướng. Robot này có nhiều ưu điểm như linh hoạt trong các mô hình chuyển động, có khả năng di chuyển tự do theo các hướng [3]. Ba động cơ được bố trí phía dưới của robot. Mỗi bánh xe được gắn trực tiếp với trục động cơ của nó nên động cơ và bánh xe có cùng tâm quay [4]. Hiện nay, robot này được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và công bố, tiêu biểu như: chiến lược điều khiển mô hình tham chiếu [1], học sâu tăng cường [2], bộ điều khiển PI [4], đánh giá sự chính xác độ bám quỹ đạo của robot như trợ lý riêng [5], thuật toán PID trong [6] để tính toán kết nối 3 động cơ DC của robot tạo nền tảng giúp robot di chuyển nhanh với một góc bất kỳ, bộ điều khiển lớp biên và PD+ thông thường [7], điều khiển bám quỹ đạo mô hình ước lượng của hệ nơ-ron mờ thích nghi [8], điều khiển bám quỹ đạo tiệm cận toàn cục với vận tốc biên [9].

Điều khiển trượt (SMC) là một trong những phương pháp điều khiển phổ biến về tính ổn định và bền vững ngay cả khi thông số mô hình thay đổi và có nhiễu ngoài [10]. Tuy nhiên, một trong những hạn chế của điều khiển trượt là xuất hiện hiện tượng dao động với tần số cao (chattering) quanh mặt trượt. Hiện tượng này là do sự không hoàn hảo và chậm trễ thời gian trong chuyển mạch, do thiết bị truyền động hằng số thời gian nhỏ, các mạch công suất dễ bị quá nhiệt dẫn đến hư hỏng, phá hủy các chuyển động cơ khí [11], [12]. Để khắc phục hiện tượng này, các nhà nghiên cứu đã đề cập và áp dụng nhiều phương pháp khác nhau, cụ thể như: điều khiển trượt hàm bão hòa kết hợp với mạng nơ-ron hồi quy Elman và giải thuật Smoothed Super Twisting [11], điều khiển trượt gần tối ưu dựa vào học củng cố tích phân [12], điều khiển trượt thích nghi dựa vào hàm hyperbolic tangent [13], điều khiển trượt đầu cuối thích nghi [14], điều khiển đa kênh bền vững [15].

Trong bài báo này, bộ điều khiển PID-SMC được đề xuất áp dụng cho điều khiển robot di động đa hướng với các nội dung được thực hiện như sau: thứ nhất, thiết kế bộ điều khiển PID-SMC để điều khiển vị trí thực tế của robot hội tụ về vị trí tham chiếu trong thời gian hữu hạn; thứ hai, bộ điều khiển này sẽ góp phần khắc phục hiện tượng chattering quanh mặt trượt.

Bài báo được trình bày với 5 phần như sau: Phần 1 là giới thiệu, mô hình toán học của robot di động đa hướng được trình bày trong phần 2, phần 3 trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển PID-SMC cho robot, kết quả mô phỏng và đánh giá được trình bày trong phần 4 và phần 5 là Kết luận.

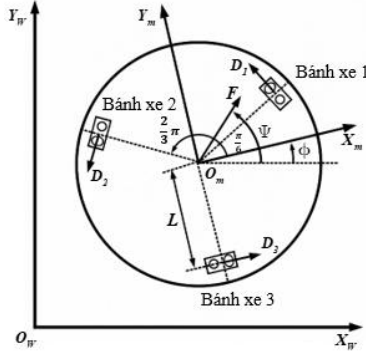
2. Mô hình toán học của robot di động đa hướng

Robot di động đa hướng holonomic hoặc nonholonomic đã được nghiên cứu bằng cách sử dụng sự đa dạng của các cơ chế máy. Cho robot di động chuyển động cứng trên không gian làm việc. Giả sử rằng hệ tọa độ tuyệt đối $O_w - X_w Y_w$ được cố định trên mặt phẳng và hệ tọa độ chuyển động $O_m - X_m Y_m$ được cố định trên tâm của trọng lực cho robot di chuyển như Hình 1 [16].

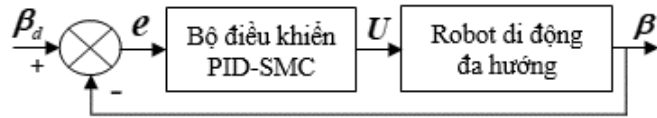
Phương trình động lực học robot như (1):

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_w \\ \ddot{y}_w \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2\dot{\phi} & 0 \\ a_2\dot{\phi} & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1\gamma_1 & b_1\gamma_2 & 2b_1\cos\phi \\ b_1\gamma_3 & b_1\gamma_4 & 2b_1\sin\phi \\ b_2 & b_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{fx} \\ D_{fy} \\ D_{f\phi} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_w \mathbf{X} + \mathbf{B}_w \mathbf{U} + \mathbf{D}_f \quad (1)$$

Với $X = [\dot{x}_w \ \dot{y}_w \ \dot{\phi}]^T$ là vector trạng thái của robot; $U = [u_x \ u_y \ u_\phi]^T$ là tín hiệu điều khiển và $D_f = [D_{fx} \ D_{fy} \ D_{f\phi}]^T$ là nhiễu hệ thống chưa biết.



Hình 1. Mô hình robot di động đa hướng



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển PID-SMC

Trong đó:

$$a_1 = \frac{-3c}{(3I_w + 2Mr^2)}; a'_2 = \frac{2Mr^2}{(3I_w + 2Mr^2)}; a_3 = \frac{-3cL^2}{(3I_w L^2 + I_v r^2)}; b_1 = \frac{kr}{(3I_w + 2Mr^2)}; b_2 = \frac{krL}{(3I_w + I_v r^2)}$$

$$A_w = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 \dot{\phi} & 0 \\ a_2 \dot{\phi} & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} b_1 \gamma_1 & b_1 \gamma_2 & 2b_1 \cos \phi \\ b_1 \gamma_3 & b_1 \gamma_4 & 2b_1 \sin \phi \\ b_2 & b_2 & b_2 \end{bmatrix}, \quad a_2 = \frac{3I_w}{(3I_w + 2Mr^2)}$$

$$\gamma_1 = -\sqrt{3} \sin \phi - \cos \phi, \gamma_2 = \sqrt{3} \sin \phi - \cos \phi, \gamma_3 = \sqrt{3} \cos \phi - \sin \phi, \gamma_4 = -\sqrt{3} \cos \phi - \sin \phi$$

Trong đó: L là khoảng cách giữa bất kỳ bộ phận và tâm trọng lực của robot; c là hệ số ma sát nhớt cho bánh xe; D_i là lực lái cho mỗi bộ phận; r là bán kính của mỗi bánh xe; I_v là mô-men quán tính của mỗi bánh xe quanh trục lái; w_i là tốc độ quay của bánh xe; k là yếu tố độ lợi lái; u_i momen xoắn ngõ vào lái.

3. Thiết kế bộ điều khiển PID-SMC cho robot

Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển PID-SMC được trình bày như Hình 2.

Trong đó $\beta = [x_w \ y_w \ \phi]^T$ và $\beta_d = [x_d \ y_d \ \phi_d]^T$.

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PID-SMC được thiết kế lần lượt với x_w , y_w và ϕ .

3.1. Đối với x_w :

Phương trình (1) được viết lại như (2):

$$\ddot{x}_w = a_1 \dot{x}_w - a_2 \dot{\phi} \dot{y}_w + b_1 \gamma_1 u_x + b_1 \gamma_2 u_y + 2b_1 \cos \phi u_\phi + D_{fx} \quad (2)$$

Sai số của x_w như (3):

$$e_x = x_w - x_d \quad (3)$$

Mặt trượt PID cho x_w như (4):

$$S_x = k_{Px} e_x + k_{Ix} \int_0^t e_x(\tau) d\tau + k_{Dx} \frac{de_x}{dt} \quad (4)$$

Thế (2) vào đạo hàm của (4), ta được (5):

$$\dot{S}_x = k_{I_x}(x_w - x_d) + k_{P_x}(\dot{x}_w - \dot{x}_d) + k_{D_x}(a_1\dot{x}_w - a_2\dot{\phi}\dot{y}_w + b_1\gamma_1 u_x + b_1\gamma_2 u_y + 2b_1 \cos \phi u_\phi + D_{f_x} - \ddot{x}_d) \quad (5)$$

Với luật tiếp cận tốc độ hằng như (6) [17]:

$$\dot{S}_x = -\eta_x \text{sign}(S_x) \quad (6)$$

Luật điều khiển PID-SMC cho x_w như (7):

$$u_{PID-SMCx} = -\frac{1}{k_{D_x} b_1 \gamma_1} \left(k_{I_x} e_x + k_{P_x} \dot{e}_x + k_{D_x} (a_1\dot{x}_w - a_2\dot{\phi}\dot{y}_w + b_1\gamma_2 u_y + 2b_1 \cos \phi u_\phi + D_{f_x} - \ddot{x}_d) + \eta_x \text{sign}(S_x) \right) \quad (7)$$

3.2. Đối với y_w :

Tương tự như trên, luật điều khiển trượt với luật tiếp cận tốc độ hằng đối với y_w như (8):

$$u_{PID-SMCy} = -\frac{1}{k_{D_y} b_1 \gamma_4} \left(k_{I_y} e_y + k_{P_y} \dot{e}_y + k_{D_y} (a_2\dot{\phi}\dot{x}_w + a_1\dot{y}_w + b_1\gamma_3 u_x + 2b_1 \sin \phi u_\phi + D_{f_y} - \ddot{y}_d) + \eta_y \text{sign}(S_y) \right) \quad (8)$$

$$\text{Với: } e_y = y_w - y_d \text{ và } S_y = k_{P_y} e_y + k_{I_y} \int_0^t e_y(\tau) d\tau + k_{D_y} \frac{de_y}{dt}$$

3.3. Đối với ϕ :

Tương tự, luật điều khiển trượt với luật tiếp cận tốc độ hằng đối với ϕ như (9):

$$u_{PID-SMC\phi} = -\frac{1}{k_{D_\phi} b_2} \left(k_{P_\phi} \dot{e}_\phi + k_{I_\phi} e_\phi + k_{D_\phi} (a_3\dot{\phi} + b_2 u_x + b_2 u_y + D_{f_\phi} - \ddot{\phi}_d) + \eta_\phi \text{sign}(S_\phi) \right) \quad (9)$$

$$\text{Với: } e_\phi = \phi_w - \phi_d \text{ và } S_\phi = k_{P_\phi} e_\phi + k_{I_\phi} \int_0^t e_\phi(\tau) d\tau + k_{D_\phi} \frac{de_\phi}{dt}$$

Vậy luật điều khiển PID-SMC robot di động đa hướng với luật tiếp cận tốc độ hằng như (10):

$$\mathbf{U}_{PID-SMC} = -(\mathbf{K}_D \mathbf{B}_w)^{-1} (\mathbf{K}_I \mathbf{e} + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_D (\mathbf{A}_w \dot{\mathbf{B}} + \mathbf{D}_f - \ddot{\mathbf{B}}_d) + \boldsymbol{\eta} \text{sign}(\mathbf{S})) \quad (10)$$

Trong đó:

$$\mathbf{U}_{PID-SMC} = \begin{bmatrix} u_{PID-SMCx} \\ u_{PID-SMCy} \\ u_{PID-SMC\phi} \end{bmatrix}; \mathbf{K}_I = \begin{bmatrix} k_{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{I_\phi} \end{bmatrix}; \mathbf{K}_P = \begin{bmatrix} k_{P_x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{P_y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{P_\phi} \end{bmatrix}; \mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} k_{D_x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{D_y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{D_\phi} \end{bmatrix}$$

Trong luật điều khiển (10), ma trận $\mathbf{B}_w$ là khả nghịch. Thật vậy, ta có (11):

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} b_1 \gamma_1 & b_1 \gamma_2 & 2b_1 \cos \phi \\ b_1 \gamma_3 & b_1 \gamma_4 & 2b_1 \sin \phi \\ b_2 & b_2 & b_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Thay $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ vào (11), ta được (12):

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} b_1(-\sqrt{3} \sin \phi - \cos \phi) & b_1(\sqrt{3} \sin \phi - \cos \phi) & 2b_1 \cos \phi \\ b_1(\sqrt{3} \cos \phi - \sin \phi) & b_1(-\sqrt{3} \cos \phi - \sin \phi) & 2b_1 \sin \phi \\ b_2 & b_2 & b_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Định thức của (12) như (13):

$$\begin{aligned}
\det(B_w) = & \left(b_1(-\sqrt{3}\sin\phi - \cos\phi)\right)\left(b_1(-\sqrt{3}\cos\phi - \sin\phi)\right)(b_2) \\
& + \left(b_1(\sqrt{3}\sin\phi - \cos\phi)\right)(2b_1\sin\phi)(b_2) + (2b_1\cos\phi)\left(b_1(\sqrt{3}\cos\phi - \sin\phi)\right)(b_2) \\
& - (2b_1\cos\phi)\left(b_1(-\sqrt{3}\cos\phi - \sin\phi)\right)(b_2) - \left(b_1(-\sqrt{3}\sin\phi - \cos\phi)\right)(2b_1\sin\phi)(b_2) \\
& - \left(b_1(\sqrt{3}\sin\phi - \cos\phi)\right)\left(b_1(\sqrt{3}\cos\phi - \sin\phi)\right)(b_2) = 6\sqrt{3}b_1^2b_2
\end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó, $b_1 = \frac{kr}{(3I_w + 2Mr^2)}$; $b_2 = \frac{krL}{(3I_w + I_v r^2)}$ chứa các thông số của robot.

Từ đó suy ra (14):

$$\det(B_w) = 6\sqrt{3}b_1^2b_2 \neq 0 \quad (14)$$

Từ (14) chứng tỏ ma trận B_w khả nghịch và ma trận nghịch đảo của B_w như (15):

$$B_w^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}\cos\phi - 3\sin\phi}{6\sqrt{3}b_1} & \frac{3\cos\phi - \sqrt{3}\sin\phi}{6\sqrt{3}b_1} & \frac{1}{3b_2} \\ \frac{3\sin\phi - \sqrt{3}\cos\phi}{6\sqrt{3}b_1} & \frac{\sqrt{3}\sin\phi - 3\cos\phi}{6\sqrt{3}b_1} & \frac{1}{3b_2} \\ \frac{\cos\phi}{3b_1} & \frac{\sin\phi}{3b_1} & \frac{1}{3b_2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Từ (14) và (15) cho thấy ma trận B_w^{-1} luôn tồn tại, do đó tồn tại luật điều khiển (10) cho robot. Để chứng minh tính ổn định, hàm Lyapunov được định nghĩa như (16):

$$V = \frac{1}{2}S^2 \quad (16)$$

Đạo hàm của (16) như (17) :

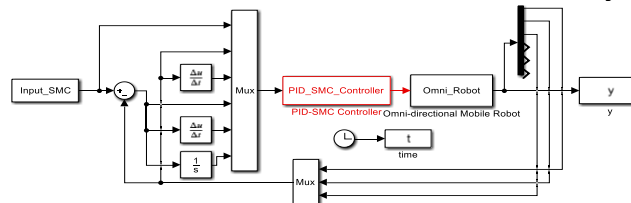
$$\begin{aligned}
\dot{V} = S\dot{S} = S \left(\begin{aligned} & K_D(A_w\dot{\beta} - \ddot{\beta}_d + D_f) + K_I e + K_P \dot{e} \\ & + K_D B_w \left(-(K_D B_w)^{-1} \left(K_I e + K_P \dot{e} + K_D(A_w\dot{\beta} - \ddot{\beta}_d + D_f) \right) \right) + \eta \text{sign}(S) \end{aligned} \right) \\
= -S\eta \text{sign}(S) = -\eta|S| < 0
\end{aligned} \quad (17)$$

Với $\eta > 0$ thì $\dot{V} \rightarrow 0$ với giá trị của η . Hệ thống sẽ ổn định theo Lyapunov. Lúc này, sai số $e(t)$ sẽ hội tụ về 0 dẫn theo $S \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow 0$. Vì thế, $e(t), \dot{e}(t) \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow 0$.

Luật điều khiển trượt (10) đảm bảo quỹ đạo thực tế của robot bám theo quỹ đạo mong muốn trong thời gian hữu hạn và giảm hiện tượng chattering.

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sơ đồ mô phỏng bộ PID-SMC với MATLAB/Simulink được trình bày như Hình 3:



Hình 3. Sơ đồ mô phỏng bộ PID-SMC với MATLAB/Simulink

Các thông số của bộ PID-SMC và robot được trình bày như Bảng 1 và Bảng 2.

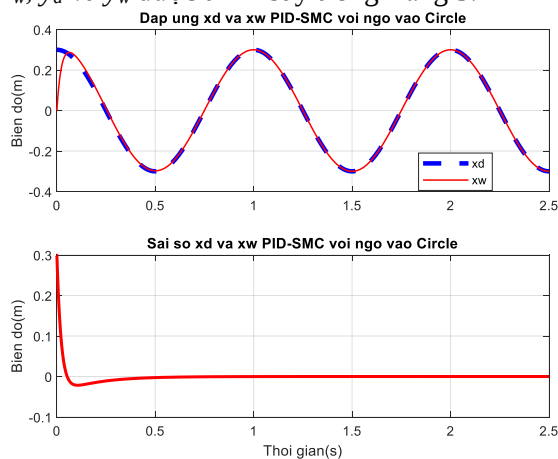
Bảng 1. Các thông số của bộ PID-SMC

Thông số	K_p	K_I	K_D	η
Giá trị	diag (5)	diag (25)	diag (0.1)	250*eye(3)

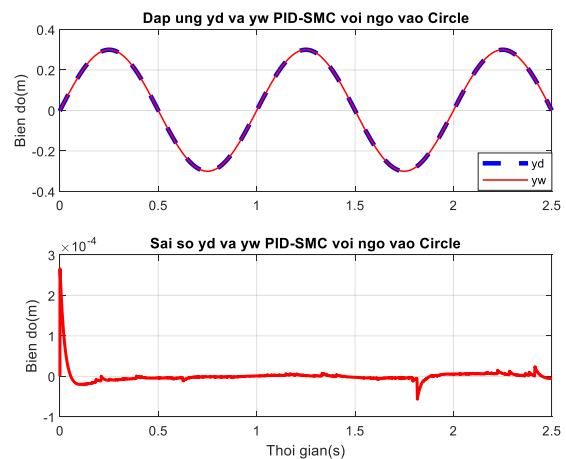
Bảng 2. Các thông số của robot

Ký hiệu	Ý nghĩa	Giá trị	Đơn vị
I_v	Mô-men quán tính của robot	11,25	kgm^2
M	Khối lượng của robot	9,4	kg
L	Khoảng cách từ mỗi bánh xe đến tâm robot	0,178	m
k	Hệ số truyền động	0,448	
c	Hệ số ma sát nhớt	0,1889	kgm^2 / s
I_ω	Mô-men quán tính của bánh xe	0,02108	kgm^2
r	Bán kính mỗi bánh xe	0,0245	m

Kết quả đáp ứng và sai số của x_d và x_w , y_d và y_w bộ điều khiển PID-SMC với ngõ vào đường tròn được trình bày như Hình 4 và 5 tương ứng. Quan sát đáp ứng trên Hình 4 và 5 ta thấy rằng, đáp ứng thực tế x_w và y_w của robot hội tụ về x_d và y_d mong muốn trong thời gian hữu hạn với độ vọt lố, thời gian tăng, thời gian xác lập của x_w là 1,963(%), $0,045 \pm 0,001(s)$, $0,28(s)$ và của y_w là 0,505(%), $0,160 \pm 0,001(s)$, $0,231(s)$, sai số xác lập hội tụ về 0. Các chỉ tiêu chất lượng của x_d và x_w , y_d và y_w được trình bày trong Bảng 3.



Hình 4. Đáp ứng và sai số của x_d và x_w

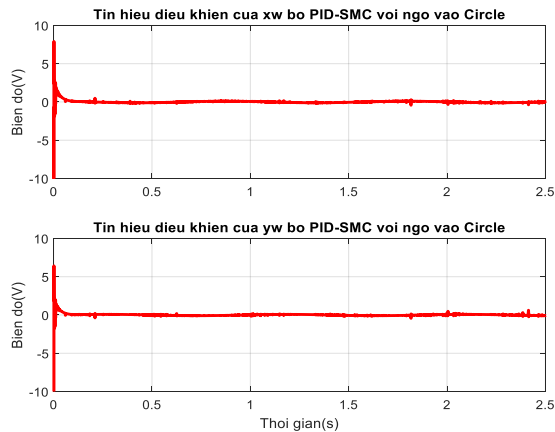


Hình 5. Đáp ứng và sai số của y_d và y_w

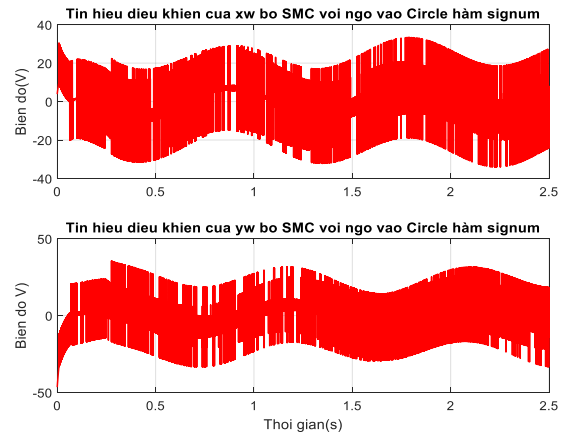
Hình 6 trình bày tín hiệu điều khiển của x_w và y_w bộ điều khiển PID-SMC với ngõ vào đường tròn. Hiện tượng chattering quanh mặt trượt của tín hiệu điều khiển đã được khắc phục so với bộ điều khiển SMC truyền thống được trình bày như Hình 7. Điều này chứng tỏ hiệu quả của bộ điều khiển PID-SMC trong điều khiển bám quỹ đạo robot và khắc phục hiện tượng chattering.

Bảng 3. Các chỉ tiêu chất lượng của bộ điều khiển PID-SMC

Chỉ tiêu chất lượng	Thời gian tăng (s)	Thời gian xác lập (s)	Độ vọt lố (%)	Sai số xác lập (m)
x_w	$0,045 \pm 0,001$	0,280	1,963	0
y_w	$0,160 \pm 0,001$	0,231	0,505	0



Hình 6. Tín hiệu điều khiển của x_w và y_w bộ điều khiển PID-SMC



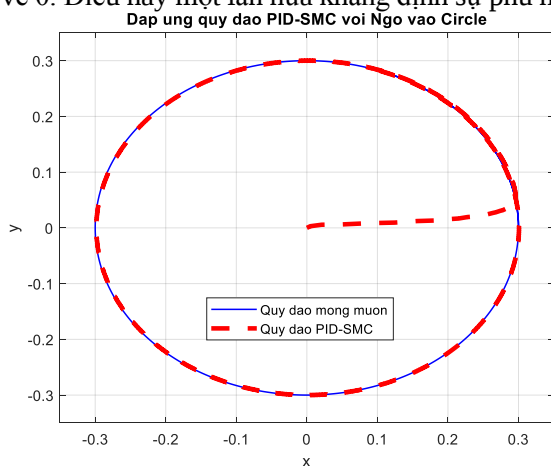
Hình 7. Tín hiệu điều khiển của x_w và y_w bộ điều khiển SMC hàm sigmoid

Các hiệu suất khác nhau của bộ điều khiển đề xuất được thể hiện trong Bảng 4 [18]:

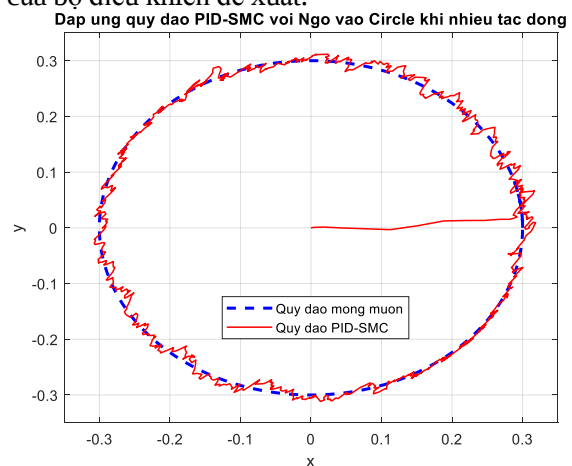
Bảng 4. Các hiệu suất sai số của bộ điều khiển PID-SMC

Tín hiệu	Hiệu suất sai số					
	AAD	MSE	RMSE	MPE	MAPE	MRE
x_w	$8,9 \times 10^{-10}$	$2,7 \times 10^{-15}$	$5,2 \times 10^{-8}$	$-3,0 \times 10^{-9}$	$3,0 \times 10^{-9}$	$-3,0 \times 10^{-7}$
y_w	$1,6 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-15}$	$9,0 \times 10^{-8}$	$8,4 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-8}$

Đáp ứng quỹ đạo của bộ điều khiển đề xuất với quỹ đạo đường tròn trong trường hợp không và có nhiễu tác động ở ngõ ra của robot (giả lập nhiễu cảm biến) được trình bày như Hình 8 và 9 tương ứng. Quỹ đạo thực tế của robot hội tụ về quỹ đạo tham chiếu trong thời gian hữu hạn với sai số tiến về 0. Điều này một lần nữa khẳng định sự phù hợp của bộ điều khiển đề xuất.



Hình 8. Đáp ứng quỹ đạo của robot



Hình 9. Đáp ứng quỹ đạo robot có nhiễu tác động

5. Kết luận

Bài báo đã thiết kế bộ điều khiển PID-SMC và ứng dụng điều khiển bám quỹ đạo robot di động đa hướng. Bộ điều khiển đề xuất đã đảm bảo quỹ đạo thực tế của robot hội tụ về quỹ đạo mong muốn trong thời gian hữu hạn với sai số bám tiến về 0 và khắc phục hiệu quả hiện tượng chattering quanh mặt trượt của tín hiệu điều khiển. Các kết quả mô phỏng kiểm chứng với MATLAB/Simulink cho thấy các tín hiệu x_w , y_w và quỹ đạo đường tròn thực tế của robot hội tụ về x_d , y_d và quỹ đạo đường tròn mong muốn đạt các chỉ tiêu chất lượng. Ngoài ra, bộ điều khiển đề

xuất còn được khảo sát với trường hợp giả lập nhiều cảm biến tác động ở ngõ ra của robot cũng cho thấy sự phù hợp, tính hiệu quả của bộ điều khiển này. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ tiếp tục ứng dụng các phương pháp điều khiển thông minh để nâng cao hiệu quả điều khiển robot và thực nghiệm trên mô hình thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] X. Liu, X. Yang, F. Hu, A. Jiang, and C. Yang, "Trajectory Tracking of an Omni-Directional Wheeled Mobile Robot Using a Model Predictive Control Strategy," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 1-15, 2018.
- [2] A. Mehmood, I. U. H. Shaikh, and A. Ali, "Application of Deep Reinforcement Learning for Tracking Control of 3WD Omnidirectional Mobile Robot," *Information Technology and Control*, vol. 50, no. 3, pp. 507-521, 2021.
- [3] R. Yunardi, D. Arifianto, F. Bachtiar, and J. Prananingrum, "Holonomic Implementation of Three Wheels Omnidirectional Mobile Robot using DC Motors," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 2, no. 2, pp. 65-71, 2021.
- [4] M. Kawtharani, V. Fakhari, and M. R. Haghjoo, "Tracking Control of an Omni-Directional Mobile Robot," *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2020, pp. 1-8.
- [5] J. Palacín, R. Elena, C. Eduard, and D. Martínez, "Evaluation of the Path-Tracking Accuracy of a Three-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot Designed as a Personal Assistant," *Sensors*, vol. 21, no. 21, pp. 1-19, 2021.
- [6] S. M. Hu, H. Y. Chen, and Y. Shao, "Triangular Omnidirectional Wheel Motion Control System," *Open Access Library Journal*, vol. 7, no. 8, pp. 1-8, 2020.
- [7] A. S. Andreev and O. A. Peregudova, "On Global Trajectory Tracking Control for an Omnidirectional Mobile Robot with a Displaced Center of Mass," *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, vol. 16, no. 1, pp. 115-131, 2020.
- [8] F. Pang, M. Luo, X. Xu, and Z. Tan, "Path Tracking Control of an Omni-Directional Service Robot Based on Model Predictive Control of Adaptive Neural-Fuzzy Inference System," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, pp. 1-8, 2021.
- [9] O. Peñaloza-Mejía, L. A. Márquez-Martínez, J. Alvarez, M. G. Villarreal-Cervantes, and R. García-Hernández, "Motion Control Design for an Omnidirectional Mobile Robot Subject to Velocity Constraints," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, pp. 1-16, 2015.
- [10] P. Vernekar and V. S. Bandal, "Robust Sliding Mode Control of a Magnetic Levitation System: Continuous-Time and Discrete-Time Approaches," *ArXiv*, vol. abs/2110.12363, pp. 1-14, 2021.
- [11] T. Zarma, S. Thomas, and A. Galadima, "Methods of Chattering Reduction in Sliding Mode Control: A Case Study of Ball and Plate System," *IEEE 7th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 2018, pp. 1-9.
- [12] L. Guo, H. Zhao, and Y. Song, "A Nearly Optimal Chattering Reduction Method of Sliding Mode Control with an Application to a Two-wheeled Mobile Robot," *ArXiv*, vol. abs/2110.12706, pp. 1-20, 2021.
- [13] J. -S. Fang, J. S.-H. Tsai, J.-J. Yan, and S.-M. Guo, "Adaptive Chattering-Free Sliding Mode Control of Chaotic Systems with Unknown Input Nonlinearity via Smooth Hyperbolic Tangent Function," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, no. 6, pp. 1-9, 2019.
- [14] L. Wan, G. Chen, M. Sheng, Y. Zhang, and Z. Zhang, "Adaptive chattering-free terminal sliding-mode control for full-order nonlinear system with unknown disturbances and model uncertainties," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 1-11, 2020.
- [15] A. Can, H. Efstathiades, and A. Montazeri, "Desing of a Chattering-Free Sliding Mode Control System for Robust Position Control of a Quadrotor," *International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR)*, 2020, pp. 1-6.
- [16] K. Watanabe, "Control of an Omni-directional mobile robot," *Second International Conference. Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems. Proceedings KES'98 (Cat. No.98EX111)*, vol. 1, 1998, pp. 51-60.
- [17] J. Liu and X. Wang, *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Springer, 2012.
- [18] I. Mukherjee and S. Routroy, "Comparing the performance of neural networks developed by using Levenberg-Marquardt and Quasi-Newton with the gradient descent algorithm for modelling a multiple response grinding process," *Expert Syst. Appl*, vol. 39, no. 3, pp. 2397-2407, 2012.