

RESEARCH AND DESIGN CONTROLLER FOR MOBILE ROBOT ON THE BASIS OF SLIDING MODE CONTROL METHOD

Vu Thi To Linh

University of Economics - Technology for Industries

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 20/02/2022</p> <p>Revised: 20/4/2022</p> <p>Published: 21/4/2022</p>	<p>This paper presents a research method to design a controller for the drive system of a omnidirectional mobile robot in an unknown flat environment, based on the sliding control method, taking into account nonlinear factors (slip of the wheel). This problem helps the mobile robot to ensure stability in both the forward and backward movements of the robot. Moreover, the process of the robot must overcome obstacles on the way, so that the robot still works stably without encountering any obstacles, until it reaches the destination safely. The simulation results are performed in the Matlab Simulink environment to demonstrate the correctness of the proposed algorithm. Moreover, these research results will be the basis for the establishment of control algorithms, electric drive system design for mobile robots in industry, in the medical field and in transportation.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Mobile robot Sliding mode control Electric drive Nonlinear Control Intelligent control</p>	

NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO ROBOT DI ĐỘNG TRÊN CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Vũ Thị Tố Linh

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 20/02/2022</p> <p>Ngày hoàn thiện: 20/4/2022</p> <p>Ngày đăng: 21/4/2022</p>	<p>Bài báo này trình bày một phương pháp nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống truyền động của robot di động đa hướng trong môi trường phẳng không xác định, trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt, có tính đến yếu tố phi tuyến (trượt của bánh xe). Vấn đề này giúp robot di động đảm bảo sự ổn định trong cả chuyển động tịnh tiến, chuyển động lùi của robot. Hơn thế nữa quá trình robot phải vượt chướng ngại vật trên đường đi, sao cho robot vẫn làm việc ổn định mà không gặp bất kỳ một trở ngại nào, đến khi về đích một cách an toàn. Các kết quả mô phỏng được thực hiện trong môi trường Matlab Simulink nhằm minh chứng tính đúng đắn của thuật toán đã đề xuất. Hơn nữa những kết quả nghiên cứu này sẽ là cơ sở cho việc thiết lập các thuật toán điều khiển, thiết kế hệ thống truyền động điện cho robot di động trong công nghiệp, trong lĩnh vực y tế và trong giao thông vận tải.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Robot di động Điều khiển trượt Truyền động điện Điều khiển phi tuyến Điều khiển thông minh</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5558>

Email: vttlinh@uneti.edu.vn

<http://jst.tnu.edu.vn>

95

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, robot di động đang được sử dụng trong các nhiệm vụ quan trọng và nhiều các hoạt động khác nhau. Do khả năng thông minh mà con người chúng ta đã trang bị cho chúng: từ thuật toán điều khiển mới, hệ thống truyền động tối ưu hơn, động cơ điều khiển (động cơ servo), v.v. làm cho quá trình hoạt động của robot di động ngày càng chính xác [1], [2]. Những robot này có thể được sử dụng như một cơ sở độc lập hoặc với các cánh tay có độ cứng vững với nhiều bậc tự do và linh hoạt dựa trên bản chất của nhiệm vụ thực thi hành động [3]-[5]. Trong điều kiện môi trường thực tế, robot luôn trượt trên bề mặt và điều đó là không thể phủ nhận, trong trường hợp này yếu tố đó được coi là yếu tố phi tuyến trong điều khiển; cần được khắc phục [6], [7]. Do đó, việc mô hình hóa robot trong điều kiện lý tưởng, khi không tính đến yếu tố trượt của bánh xe gây ra thì các kết quả bao gồm không có đủ độ chính xác và sai số lớn. Quá trình trượt bánh xe như vậy được coi là ảnh hưởng đến quá trình làm việc của hệ thống. Do đó, việc sử dụng một bộ điều khiển trong chế độ trượt, nhằm đảm bảo cấu trúc của hệ thống phù hợp để đối phó với các yếu tố phi tuyến này của hệ thống truyền động cho robot, [8]-[10]. Vì vậy, đây là vấn đề rất quan trọng cần phải tính đến ngay cả khi sử dụng các thuật toán điều khiển thông minh như: trí tuệ nhân tạo, điều khiển tối ưu thích nghi bền vững,... cho robot [11]-[15].

Việc nghiên cứu quá trình điều khiển robot di động trong nhiều lĩnh vực, tác vụ khác nhau đã thể hiện rõ được tầm quan trọng của mô hình hệ thống truyền động robot. Từ một số nghiên cứu đã được thực hiện để mô hình hóa hệ thống điều khiển robot di động như ở tài liệu [7] đã nghiên cứu về một số mô hình hệ thống truyền động cho robot công nghiệp nói chung và mô hình robot tự hành, robot di động nói riêng. Tài liệu [10] thì nghiên cứu về vấn đề lập trình điều khiển, điều hướng, bám quỹ đạo trong không gian phẳng, không gian đề các cho robot tự hành và robot di động, chưa tính đến yếu tố phi tuyến biến thiên như trên. Theo Cerezo và cộng sự phát triển để ổn định robot di động vì sai trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt mà chưa xét đến vấn đề phi tuyến hay chưa tính đến độ trượt của bánh xe trái và phải [11]. Trong tài liệu [12], Roy và cộng sự đã đề xuất một bộ điều khiển bám quỹ đạo và ổn định của robot di động có bánh xe, tính đến yếu tố phi tuyến sử dụng phương pháp Backstepping để xác định bám quỹ đạo đường đi của robot di động trên cơ sở lý thuyết hình học vi phân, tổng quát hóa nhiều đầu vào nhiều đầu ra (MINO) ở dạng chuẩn bằng cách sử dụng kỹ thuật tuyến tính hóa phản hồi đầu vào đầu ra. Tuy nhiên, ở các công trình này mới chỉ dừng lại ở thiết kế và mô phỏng hệ thống mà chưa đi đánh giá rõ yếu tố phi tuyến của hệ thống truyền động cho robot. Nhìn chung vấn đề điều khiển robot di động cho lĩnh vực công nghiệp, giao thông vận tải, trong y học, v.v. đang được các nhà khoa học trong nước và trên thế giới quan tâm nghiên cứu. Trong bài viết này, mô hình động học của robot di động ba bánh được nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển có tính đến yếu tố phi tuyến (độ trượt của bánh xe), trong quá trình điều khiển trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt ở điều kiện môi trường mặt phẳng mà không có bất kỳ sự gia tăng hay biến đổi nào của các biến trạng thái trong quá trình điều khiển. Từ đó, bằng cách xác định các kết quả đầu ra thích hợp, phương pháp điều khiển trượt được sử dụng để điều hướng, điều khiển thông minh cho robot di động theo hướng mong muốn mà không gặp bất kỳ trở ngại nào trên đường đi.

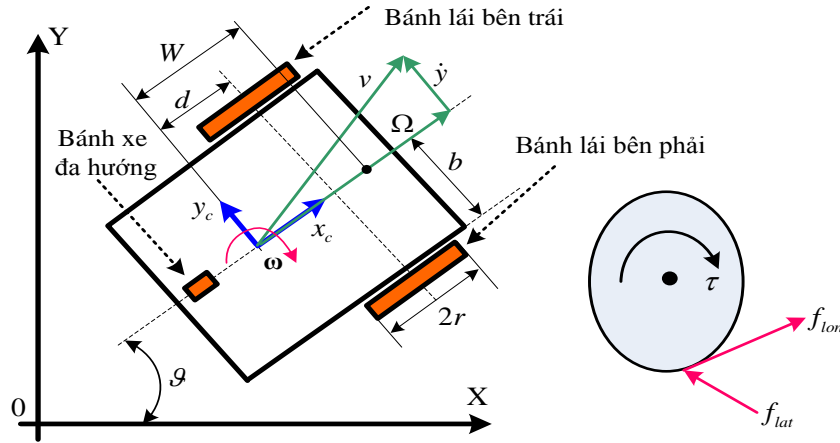
Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Phần thứ hai của bài báo là đi xây dựng mô hình động lực học và thiết kế bộ điều khiển trên cơ sở thuật toán điều khiển trượt cho robot di động. Phần thứ ba của bài báo này là xây dựng mô hình mô phỏng trên Matlab Simulink để mô phỏng bộ điều khiển và cuối cùng so sánh đánh giá kết quả mô phỏng của bộ điều khiển trượt. Phần cuối cùng là kết luận đánh giá và tài liệu tham khảo.

2. Xây dựng mô hình điều khiển cho robot di động trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt

2.1. Mô hình động lực học của robot di động

Việc nghiên cứu, phân tích động lực học của robot, đây là một hệ thống cơ học phức tạp, nhiều khối lượng và có thể nhiều bậc tự do. Mỗi bậc tự do thực hiện một chuyển động và được

điều khiển bởi một hệ truyền động điện. Hơn nữa, robot là đối tượng điều khiển chứa nhiều động cơ có liên hệ ràng buộc lẫn nhau. Để xây dựng mô hình hệ thống điều khiển cho robot ta xem xét một robot di động như hình 1 với ba bánh xe, hai bánh xe hai bên: bánh lái bên trái, một bánh lái bên phải và một bánh xe phía trước (đa hướng) có thể làm cho robot di động giữ thẳng bằng và không gây ra bất kỳ hạn chế chuyển động nào đối với robot di động [2]-[4], [9], [10], [15]. Trong đó ở hình 1 mô tả một robot di động có bánh xe với hai bánh chủ động x_c và y_c là vị trí robot trong mặt phẳng, ϑ là định hướng robot, φ_r là góc của bánh xe bên phải, φ_l là góc của bánh xe bên trái, b là nửa chiều rộng của robot, d là khoảng cách từ trọng tâm đến trục bánh xe và r là bán kính bánh xe. Đối với robot này, chuyển động tự do của bánh xe di động không được xem xét trong mô hình động học như hình sau.



Hình 1. Mô hình động học và điều khiển robot di động đa hướng

Khi đó ta gọi tọa độ tổng quát của hệ thống là $q = [x_c \ y_c \ \vartheta \ \varphi_r \ \varphi_l]^T$, phương trình động lực học của hệ truyền động khi có tính đến hiện tượng trượt bánh xe được thiết lập như sau [1], [4]:

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) = N\tau(t) - A^T(q)\lambda + F(q, \dot{q}) \quad (1)$$

Trong đó, $[M(q)]_{5 \times 5}$ là ma trận quán tính, $[c(q, \dot{q})]_{5 \times 1}$ là Coriolis và ma trận lực ly tâm, $[\tau]_{2 \times 1}$ là véctơ của các đầu vào của hệ thống, $[N]_{5 \times 5}$ là ma trận của các hệ số đầu vào của hệ thống, λ là véctơ nhân tử Lagrange và $[F(q, \dot{q})]_{5 \times 1}$ là véctơ lực kéo.

Sự ràng buộc của hệ thống khi xét đến độ trượt của bánh xe được viết dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c \cos(\vartheta) + \dot{y}_c \sin(\vartheta) + b\dot{\vartheta} &= r\dot{\varphi}_r - \zeta_r \\ \dot{x}_c \cos(\vartheta) + \dot{y}_c \sin(\vartheta) - b\dot{\vartheta} &= r\dot{\varphi}_l - \zeta_l \\ -\dot{x}_c \sin(\vartheta) + \dot{y}_c \cos(\vartheta) - d\dot{\vartheta} &= \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó, ζ_r là độ trượt dọc của bánh xe bên phải, ζ_l là độ trượt dọc của bánh xe bên trái và γ là độ trượt bên ngang.

$$A(q) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & \sin(\vartheta) & b & -r & 0 \\ \cos(\vartheta) & \sin(\vartheta) & -b & 0 & -r \\ -\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) & -d & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r(b \cos(\vartheta) - d \sin(\vartheta))}{2b} & \frac{r(b \cos(\vartheta) + d \sin(\vartheta))}{2b} \\ \frac{r(d \cos(\vartheta) + b \sin(\vartheta))}{2b} & \frac{r(-d \cos(\vartheta) + b \sin(\vartheta))}{2b} \\ \frac{1}{2b} & -\frac{1}{2b} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận ràng buộc của hệ thống $A(q)$ được suy ra dựa trên $A(q)\dot{q} = 0$ từ các ràng buộc hệ thống không trượt và ma trận không gian rỗng của các ràng buộc $S(q)$ thu được dưới dạng như ở phương trình (3) và (4).

Động học của robot di động trong điều kiện trượt bánh xe được viết dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= \Omega \cos(\vartheta) - \Delta \sin(\vartheta) \\ \dot{y}_c &= \Omega \sin(\vartheta) + \Delta \cos(\vartheta) \\ \dot{\vartheta} &= \omega \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó:

$$\omega = \frac{r\dot{\varphi}_r - r\dot{\varphi}_l}{2b} - \frac{r\dot{\zeta}_r - r\dot{\zeta}_l}{2b}; \Omega = \frac{r\dot{\varphi}_r + r\dot{\varphi}_l}{2} - \frac{r\dot{\zeta}_r + r\dot{\zeta}_l}{2}; \Delta = d\left(\frac{r\dot{\varphi}_r - r\dot{\varphi}_l}{2b} - \frac{r\dot{\zeta}_r - r\dot{\zeta}_l}{2b}\right) + \dot{\gamma} \quad (6)$$

Đến đây ta viết lại (5) dưới dạng ma trận, khi đó \dot{q} trở thành phương trình (7) như sau:

$$\dot{q} = H(q)(R - \dot{\zeta}) + \psi \quad (7)$$

Trong đó:

$$R = [v \quad \omega]^T \quad (8)$$

$$\psi = [-\dot{\gamma} \sin(\vartheta) \quad \dot{\gamma} \cos(\vartheta) \quad 0 \quad \dot{\zeta}_r \quad \dot{\zeta}_l]^T \quad (9)$$

$$\dot{\zeta} = \left[\frac{r(\dot{\zeta}_r + \dot{\zeta}_l)}{2} \quad \frac{r(\dot{\zeta}_r - \dot{\zeta}_l)}{2b} \right]^T \quad (10)$$

$$H(q) = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -d \sin(\vartheta) \\ \sin(\vartheta) & d \cos(\vartheta) \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Lấy đạo hàm của (7) và thay vào biểu thức (1), ta được (12) như sau:

$$M(q) \left[\dot{H}(q)(R - \dot{\zeta}) + H(q)(\dot{R} - \ddot{\zeta}) + \dot{\psi} \right] + c(q, \dot{q}) = N\tau - A^T(q)\lambda \quad (12)$$

Từ phương trình $S^T(q)A^T(q) = 0$, thực hiện với việc nhân $S^T(q)$ vào trong cả hai vế của phương trình (12), chúng ta bỏ qua số hạng $A^T(q)\lambda$ và khi đó ta được (13) như sau:

$$\begin{aligned} \dot{R} = (S^T(q)M(q)H(q))^{(-1)} \times & \left[-S^T(q)M(q)\dot{H}(q)(R - \dot{\zeta}) + S^T(q)N\tau - S^T(q)M(q)\dot{\psi} + \right. \\ & \left. - S^T c(q, \dot{q}) \right] + \ddot{\zeta} \end{aligned} \quad (13)$$

Xét $v = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix}$, vì từ phương trình không gian trạng thái của hệ được viết theo là $\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{v} \end{bmatrix}$, nên cần phải tính toán và biến đổi, khi đó ta được phương trình (14) như sau:

$$R(t) = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = Pv, \quad P = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Vì vậy ta được:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(q)(R - \dot{\zeta}) + \psi(q, \dot{\eta}) \\ (S^T MHP)^{(-1)} \left[-S^T M\dot{H}(R - \dot{\zeta}) - S^T M\dot{\psi} - S^T c \right] + P^{(-1)} \dot{\zeta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T MHP)^{(-1)} S^T N\tau \end{bmatrix} \quad (15)$$

Lúc này ta xét đến vấn đề lực kéo theo chiều dọc và theo phía bên ngang liên quan đến hệ thống truyền động robot như sau: lực kéo là một hàm của tỷ số trượt (sr) và góc trượt (sa) được xác định dưới dạng $sr = \frac{\dot{\zeta}}{\max(|r\dot{\phi}|, |r\dot{\phi} - \dot{\zeta}|)}$ và $sa = \arctan\left(\frac{\dot{\gamma}}{|r\dot{\phi} - \dot{\zeta}|}\right)$. Bằng cách ta xét rằng cả thành phần (sr) và (sa) đều nhỏ ở trong bài báo này, khi đó lực kéo dọc và lực kéo ngang được ước tính tuyến tính dưới dạng phương trình (16) và (17), trong đó $\delta > 0$ và $\varsigma < 0$, theo [5], [7].

$$f_{dọc} = \delta \frac{\dot{\zeta}}{|r\dot{\phi} - \dot{\zeta}|} \quad (16)$$

$$f_{ngang} = \varsigma \frac{\dot{\gamma}}{|r\dot{\phi} - \dot{\zeta}|} \quad (17)$$

Quá trình chuyển động và điều hướng tự động hay tránh chướng ngại vật trên đường đi của robot luôn luôn tạo ra các lực tại các bánh xe, các lực này thông thường sinh ra tại các thời điểm khi gặp chướng ngại vật, đường nhấp nhô, v.v.

2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt có tính đến yếu tố phi tuyến cho hệ thống truyền động của robot

Phần này mô tả những tính toán phương trình động học về bộ điều khiển trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt và cách thực thi thuật toán cho robot di động trong điều kiện có tính đến yếu tố trượt bánh xe. Với phương pháp điều khiển trượt, cần phải xác định sai số bám sát của hệ thống bằng cách tính toán, xác định giá trị đầu ra mong muốn của hệ thống (trên cơ sở giá trị đặt vào của hệ thống) là: $e(x) = y - y_d$. Bằng cách xác định sai số bám sát, khi đó mặt trượt được lựa chọn dưới dạng phương trình (18), trong đó μ là ma trận đường chéo. Mặt trượt phải được tính toán, xác định sao cho bằng cách tiếp cận đưa sai số bám sát về 0, mặt trượt và thành phần của nó cũng luôn tiệm cận về 0.

$$s(x) = \dot{e}(x) + \mu e(x) \quad (18)$$

Với một robot di động có bánh xe, đầu ra của hệ thống được coi là một hàm chức năng trên cơ sở số lần tác động, đầu vào điều khiển có thể quan sát được. Trong trường hợp này, để quan sát ảnh hưởng của hướng đi robot đến đầu ra của hệ thống. Khi đó điểm tác động điều khiển (w) là điểm mà bánh xe robot sinh ra độ trượt bị quay xung quanh và trên hệ thống được hiển thị như trong hình 1, $w = d$. Do đó, đầu ra của robot di động có bánh xe được cho bởi biểu thức (19):

$$y = \begin{bmatrix} x_c + w \cos(\mathcal{G}) \\ y_c + w \sin(\mathcal{G}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Để quan sát được đầu vào điều khiển, cần đạo hàm hai lần của đầu ra trong (19). Bằng cách lấy đạo hàm theo thời gian của phương trình (19). Khi đó ta có phương trình (20) như sau:

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c - w\dot{\theta}\sin(\theta) \\ \dot{y}_c + w\dot{\theta}\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Bằng cách thay \dot{x}_c thành \dot{y}_c từ phương trình (5) vào phương trình (20) và lấy đạo hàm theo thời gian của phương trình (20), ta đạt được phương trình (21) như sau:

$$\ddot{y} = \alpha(\varphi_r, \varphi_l, \dot{\varphi}_r, \dot{\varphi}_l)\dot{v} + \beta(\varphi_r, \varphi_l, \dot{\varphi}_r, \dot{\varphi}_l) \quad (21)$$

Sau khi thay \dot{v} từ phương trình (15) cho robot di động trong phương trình (21), phương trình (22) đạt được là:

$$\ddot{y} = \alpha\{(S^T(q)M(q)H(q)P)^{(-1)} \times [-S^T(q)M(q)\dot{H}(q)(R - \dot{\zeta}) + S^T(q)N\tau + S^T(q)M(q)\dot{\psi} - S^T c(q, \dot{q})] + P^{(-1)}\ddot{\zeta}\} + \beta \quad (22)$$

Trên cơ sở định nghĩa sai số bám sát của hệ thống, bằng cách lấy đạo hàm theo thời gian của mặt trượt ở dạng $\dot{s} = \ddot{e} + \mu\dot{e}$. Lúc này đầu ra của hệ thống có thể được quan sát theo (23) là:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{y} - \ddot{y}_d + \mu\dot{e} \\ &= \alpha\{(S^T(q)M(q)H(q)P)^{(-1)} \times [-S^T(q)M(q)\dot{H}(q)(R - \dot{\zeta}) + S^T(q)N\tau + S^T(q)M(q)\dot{\psi} - S^T c(q, \dot{q})] + P^{(-1)}\ddot{\zeta}\} + \beta - \ddot{y}_d + \mu\dot{e} \end{aligned} \quad (23)$$

Thực hiện coi hàm Lyapunov là $V = (1/2)S^2$ và lấy đạo hàm của nó rồi áp dụng điều kiện ổn định cho hệ thống. Khi đó đầu vào điều khiển tương đương sẽ thu được cho các trạng thái còn lại trên mặt trượt là phương trình (24) có dạng sau:

$$\begin{aligned} \tau &= \alpha^{(-1)}(S^T(q)M(q)H(q)P)[- \beta + \ddot{y}_d - \mu\dot{e}] + S^T(q)M(q)\dot{H}(q)(R - \dot{\zeta}) + S^T(q)M(q)\dot{\psi} + S^T c(q, \dot{q}) - P^{(-1)}\ddot{\zeta} \end{aligned} \quad (24)$$

Hơn nữa, với một đầu vào được hiệu chỉnh ở dạng phương trình (25) được thêm vào đầu vào hệ thống tương đương trong phương trình (24) để hướng các trạng thái về phía mặt trượt [7].

$$\tau_{hieuchinh} = -K\text{sign}(s) \quad (25)$$

Trong đó, K là ma trận đường chéo 2x2 có giá trị không đổi. Kết quả tổng đầu vào thu được:

$$\tau_{tong} = \tau + \tau_{hieuchinh} \quad (26)$$

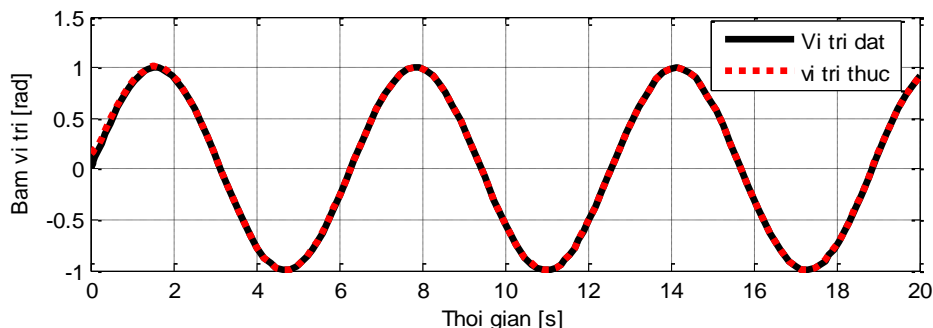
Tiếp theo, để có thể kiểm tra tính đúng đắn của luật điều khiển và động học hệ thống và các biến sai số thông qua việc xây dựng mô hình mô phỏng trong Matlab S-Function.

3. Kết quả nghiên cứu

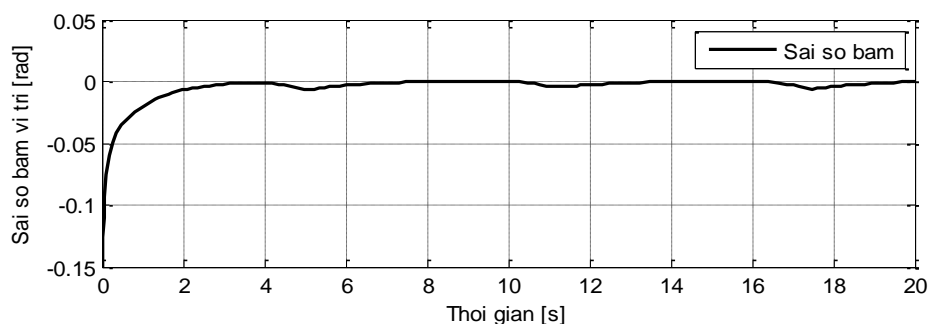
Nghiên cứu khảo sát một loại robot di động ba bánh TurtleBot đã được cải tiến với các tham số như sau: sử dụng máy tính nhúng Raspberry Pi 3 Model B+ hỗ trợ Ubuntu, cảm biến khoảng cách Laser (LDS) 350 độ, và phạm vi quét laser trong vòng 15m tạo ra dữ liệu bản đồ được sử dụng cho quá trình điều khiển, vận tốc tuyến tính tối đa của robot là 0,22 m/s và vận tốc góc tối đa 2,84 rad/s (162,72 độ/s), động cơ điều khiển hai bánh xe trái và phải là động cơ kích từ nam châm vĩnh cửu DC servo JGB37 điện áp 12 Vol - DC, tải trọng 70 kgN.

Tiến hành mô phỏng được thực hiện trong môi trường Matlab Simulink với thuật toán điều khiển đã đề xuất ở chế độ trượt, từ điểm bắt đầu đến điểm và quỹ đạo. Ở chế độ điểm tới điểm, robot bắt đầu di chuyển từ (0, 0) đến điểm mong muốn (1, 1, 5) trong vòng 20s. Hơn nữa, các tham số lựa chọn trong điều khiển như sau: vận tốc trượt nằm trong khoảng và các tham số lựa chọn như sau: quỹ đạo mong muốn $y_d = \sin(t)$; tham số tối ưu bộ điều khiển trong chế độ trượt là $K = 3I_{2 \times 2}$ và $\mu = 7I_{2 \times 2}$, độ trượt dọc của bánh xe phía bên phải $\dot{\zeta}_r = 2\exp(-1t)\cos(2t)$, độ

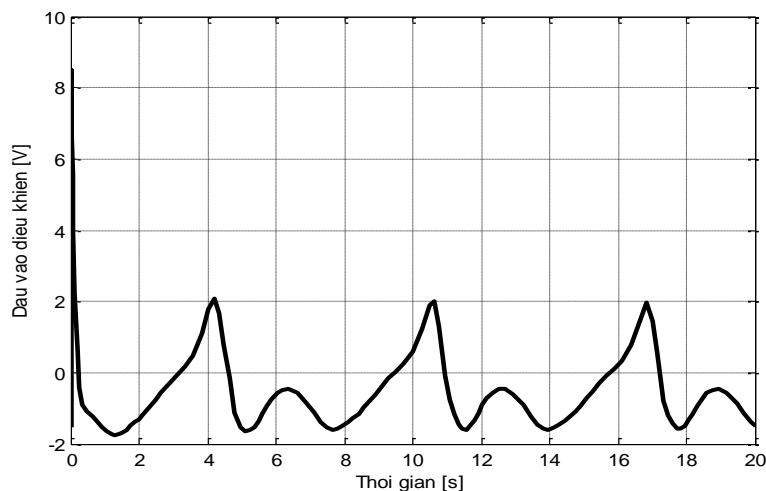
trượt dọc của bánh xe phía bên trái $\zeta_1 = 2.2exp(-1t)cos(2t)$ và độ trượt bên ngang dọc theo thân robot là $\dot{\gamma} = exp(-1t)sin(2t)$, ta có một số kết quả như sau.



Hình 2. Vị trí đặt và vị trí thực của quá trình điều khiển của robot di động



Hình 3. Sai số bám sát vị trí trong điều khiển



Hình 4. Tín hiệu đầu vào điều khiển của hệ thống

Kết quả mô phỏng với vị trí làm việc của robot trong môi trường phẳng khi tính đến yếu tố phi tuyến độ trượt của bánh xe trong quá trình chuyển động từ điểm bắt đầu đến điểm đích. Ta thấy với kết quả từ hình 2 đến hình 4 đã xác định tính hội tụ của thuật toán điều khiển. Ta rút ra những nhận xét sau:

Quá trình điều khiển bám vị trí với độ chính xác cao đã bám theo giá trị đặt là tín hiệu biến thiên theo hình sin. Lượng ra bám sát lượng vào ở quá trình cân bằng (ở hình 2), hệ thống đã ổn định với các thuật toán được đề xuất với sai số bám sát nhỏ (hình 3), tín hiệu vào điều khiển của hệ thống đáp ứng đúng với thuật toán và quá trình điều khiển (hình 4). Sai số bám sát vị trí chỉ xảy ra tại thời điểm chuyển đổi trạng thái của tín hiệu đặt, điều này là phù hợp với đặc tính điều

hiển của hệ thống bám phi tuyến này; so với bộ điều khiển được đề xuất trong [11]. Do sai số này nhỏ hơn, điều đó chứng tỏ bộ điều khiển được đề xuất đã mang lại chất lượng điều khiển cao.

Các kết quả nghiên cứu là cơ sở để thực hiện những hướng nghiên cứu tiếp theo: tính toán, thiết kế chế tạo, thiết lập thuật toán điều khiển cho hệ thống truyền động robot với trí tuệ nhân tạo. Kết hợp với điều khiển trượt thích nghi bền vững nhằm ứng dụng vào thực tế trong công nghiệp, trong y tế, trong giao thông vận tải và dân dụng ở nước ta hiện nay đang có nhu cầu cao về tự động hóa quá trình công nghệ.

4. Kết luận

Bài báo này trình bày việc nghiên cứu tính toán thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống truyền động robot di động đa hướng trong môi trường phẳng không xác định. Trên cơ sở phương pháp điều khiển trượt, có tính đến yếu tố phi tuyến trượt bánh xe và động học của hệ thống nhằm đảm bảo tối ưu hóa với thuật toán đã tổng hợp đề xuất. Các kết quả nghiên cứu đã thể hiện được vấn đề nghiên cứu và hướng giải quyết, thể hiện ở quá trình điều khiển vị trí, đường đi của robot luôn có sự hội tụ của sai số bám sát dần về không sau một khoảng thời gian nhất định. Sự ổn định tiệm cận của mô hình được chứng minh thông qua phân tích ổn định Lyapunov. Các kết quả mô phỏng cho thấy chế độ làm việc của robot đã chứng minh tính hiệu quả của thuật toán đề xuất trong bài báo này. Do đó, mô hình toán học hệ thống robot trong bài báo mà tác giả đã lựa chọn nghiên cứu như trên hoàn toàn có thể ứng dụng vào trong thực tế để nâng cao chất lượng điều khiển cho các robot di động; robot tự hành trong công nghiệp, trong y tế và trong giao thông vận tải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. T. Nguyen, *Analysis and control of industrial robots*. Science and Technics Publishing House (in Vietnamese), Hanoi, Vietnam, 2016.
- [2] A. Bacciotti, *Stability and Control of Linear Systems*. Publishing Ltd; Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [3] D. C. Tran, *Electric drive*. Science and Technics Publishing House (in Vietnamese), Hanoi, Vietnam, 2016.
- [4] V. K. Nguyen, *Dynamics of many-body systems*. Science and Technics Publishing House (in Vietnamese), Hanoi, Vietnam, 2018.
- [5] D. P. Nguyen, *The Advanced control theory*. Science and Technics Publishing House (in Vietnamese), Hanoi, Vietnam, 2016.
- [6] A. Bartoszewicz, *Sliding mode control*, first published March Printed in India, 2011.
- [7] T. T. Nguyen, *Application of General Sliding Control to Control Electromechanical System* (for graduate training). People's Army Publishing House (in Vietnamese), Hanoi, Vietnam, 2018.
- [8] L. Keviczky, R. Bars, J. Hetthéssy, and C. Bányász, *Control Engineering: MATLAB Exercises*. Publishing by Springer Nature Singapore Pte Ltd, USA ISSN 1439-2232, 2019.
- [9] R. Grimmer, *Mastering BeagleBone Robotics*. Publishing by Packt Publishing Ltd, United Kingdom, 2016.
- [10] T. Hughes, *Robot Programming: A Guide to Controlling Autonomous Robots*, 2nd Edition, Que Publishing, 2020.
- [11] A. D. Cerezo, D. Biel, J. M. Olm, and V. Repecho "Sliding mode control of a differential-drive mobile robot following a path," *European Control Conference*, Napoli, Italy, June 2019, pp. 4061- 4066.
- [12] M. J. Rabbani and A. Y. Memon, "Trajectory Tracking and Stabilization of Nonholonomic Wheeled Mobile Robot Using Recursive Integral Backstepping Control," *Electronics*, vol. 10, pp. 1-22, August 2021.
- [13] P. Roy, S. Sarkar, B. K. Roy, and N. Singh, "A comparative study between fractional order SMC and SMC applied to magnetic levitation system," *In 2017 Indian control conference (ICC)*, 2017, pp. 473-478.
- [14] L. Xin, Q. Wang, J. She, and Y. Li, "Robust adaptive tracking control of wheeled mobile robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 78, pp. 36-48, 2016.
- [15] W. Zhang, J. Bae, and M. Tomizuka, "Modified Preview Control for a Wireless Tracking Control System With Packet Loss," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 299-307, 2015.