

Thiết kế, triển khai và kiểm chứng Bộ điều khiển thích nghi mờ cho Robot di động có bánh xe bám quỹ đạo

Design, Implementation and Verification an Adaptive Fuzzy logic controller for Trajectory Tracking in Wheeled Mobile Robots

Hồ Sỹ Phương¹, Trần Phương Nam¹, Mai Thế Anh¹, Dương Đình Tú¹, Lê Văn Chương¹, Phan Văn Vỹ, Lê Thị Thu Uyên¹

¹Viện Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Vinh

Email: hosyphuong@gmail.com; tranphuongnam292003@gmail.com

Abstract

This paper investigates the integration of PID controller, Backstepping controller, and Fuzzy logic for controlling nonholonomic autonomous robots. The main objective is to enhance the robot's mobility and interaction capabilities in real-world environments, focusing on position control for trajectory tracking. The proposed method employs a PID controller to regulate the robot's linear velocity and steering angle. This is combined with a Backstepping controller to address the system's nonlinearities. Additionally, Fuzzy logic is used to adaptively adjust the parameters of the controllers, improving adaptability and robustness under varying conditions. The study emphasizes addressing the overshoot challenge encountered during trajectory tracking. By combining the aforementioned controllers, the proposed method achieves superior performance in maintaining the robot's position along the predefined trajectory while minimizing overshoot within a specified time frame.

Keywords

PID controller, Backstepping controller, Fuzzy logic, Trajectory tracking.

Tóm tắt

Bài báo này tập trung vào nghiên cứu và thực nghiệm việc kết hợp bộ điều khiển PID, bộ điều khiển Backstepping và Fuzzy logic để kiểm soát robot tự hành dạng nonholonomic. Mục tiêu chính của nghiên cứu là cải thiện khả năng di chuyển và tương tác của robot trong môi trường thực tế, đặc biệt là trong việc điều khiển vị trí để bám theo quỹ đạo. Phương pháp này lựa chọn sử dụng bộ điều khiển PID để điều khiển vận tốc tuyến tính và góc lái của robot cùng với bộ điều khiển Backstepping để xử lý các vấn đề phi tuyến tính của hệ thống. Đồng thời, các tham số của bộ điều khiển được điều chỉnh thích ứng bởi Logic mờ. Nghiên cứu nhấn mạnh vào việc đối mặt với thách thức của độ vọt lớn khi điều khiển robot bám quỹ đạo. Bằng cách kết hợp các bộ điều khiển trên, nhóm tác giả đã đạt được hiệu suất tốt hơn trong việc duy trì vị trí của robot theo quỹ đạo cho trước, đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của độ vọt lớn trong thời gian xác lập.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
w	rad/s	vận tốc góc
v	m/s	vận tốc dài
θ	rad/s	hướng của robot
$2D$	m	khoảng cách giữa tâm hai bánh xe
$2r$	m	đường kính bánh xe

Chữ viết tắt

PID	Proportional Integral Derivative
WMR	Wheeled Mobile Robots

1. Giới thiệu

Hiện nay, robot ngày càng được ứng dụng một cách rộng rãi và phổ biến trong nhiều lĩnh vực khác nhau của cuộc sống. Một khía cạnh quan trọng và không thể thiếu trong kỹ thuật robot có thể đề cập đến ở đây là điều khiển bám quỹ đạo đặt. Nó đề cập đến khả năng đi theo đường dẫn hoặc quỹ đạo cho trước một cách chính xác và hiệu quả, là nền tảng trong các ứng dụng robot khác nhau, bao gồm các phương tiện tự động điều hướng giao thông, máy bay không người lái di chuyển theo đường bay cụ thể hoặc robot di động thực hiện các chuyển động chính xác trong sản xuất. Việc phát triển các thuật toán điều khiển bám quỹ đạo chính xác góp phần nâng cao hiệu suất, độ an toàn và hiệu quả tổng thể của robot. Nhờ một số đặc điểm về tính đơn giản và linh hoạt, robot di động có bánh xe cũng được ứng dụng nhiều trong các công việc nguy hiểm hoặc ở các vị trí không thuận lợi, vì vậy việc nghiên cứu nâng cao chất lượng điều khiển robot đang ngày vẫn luôn nhận được sự quan tâm của các nhà khoa học. Điều khiển robot bám quỹ đạo trên cơ sở động học và động lực học cũng được đề cập trong nhiều nghiên cứu [[1]-[4]], tuy nhiên trước các thách thức về vấn đề phi tuyến và nhiễu loạn trong môi trường thực nghiệm thì như vậy là chưa đủ. Để đối phó với các vấn đề này, cũng đã có nhiều công bố được đưa ra với các cách tiếp cận khác nhau. Điều khiển trượt là một trong những lựa chọn được đưa ra trong [5]-[7], tuy nhiên hiện tượng chattering lại là một thách thức lớn khi đối diện với các nhiễu lớn hơn. Điều khiển thích nghi trên cơ sở ứng dụng Neural network, một sơ đồ điều khiển đã được đề xuất để giải quyết vấn đề điều khiển bám quỹ đạo trong điều kiện tham số mô hình là thay đổi trong quá trình chuyển

động [8]. Tuy nhiên, việc xử lý đáp ứng thời gian thực trong thực nghiệm là bất khả thi vì tính phức tạp của phương pháp. Một hướng tiếp cận khả thi đơn giản và hiệu quả phải kể đến là bộ điều khiển Backstepping [9-12], với những ưu điểm trong cải thiện hiệu suất và độ bền của hệ thống [13].

Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất một bộ điều khiển bám quỹ đạo cho mô hình robot thực nghiệm, trên cơ sở kết hợp sự đơn giản trong cấu trúc của bộ điều khiển Backstepping, tính thực tế của bộ điều khiển PID và kinh nghiệm điều khiển trong Logic mờ nhằm tối ưu hóa khả năng điều khiển bám quỹ đạo và chống lại ảnh hưởng từ các nhiễu không mong muốn từ môi trường phía ngoài cũng như sự thay đổi của tham số mô hình robot trong quá trình hoạt động. Từ đó nâng cao hiệu suất và đảm bảo sự ổn định cho hoạt động của robot.

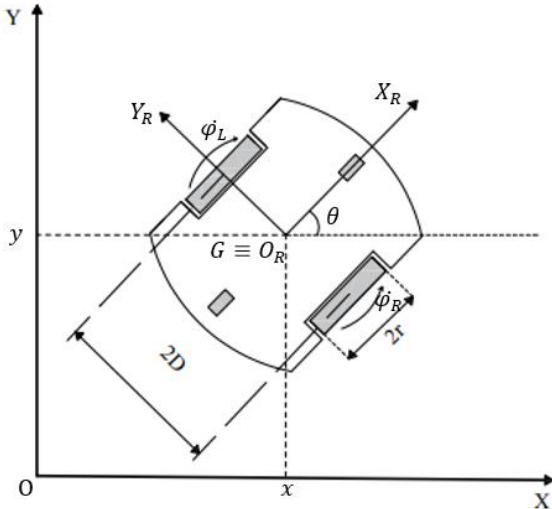
Cấu trúc của bài báo bao gồm 5 phần, trong đó phần 2 phân tích và mô hình hóa robot di động. Phần 3 thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo cho robot được đề xuất trên cơ sở kết hợp các bộ điều khiển Backstepping, PID và Fuzzy. Phần 4 thể hiện kết quả thực nghiệm và hiệu quả của bộ điều khiển trên mô hình thực tế. Cuối cùng là nhận xét và kết luận ở phần 5.

2. Mô hình hoá robot

2.1 Mô hình toán học

Cấu trúc của robot di động được thiết kế có bốn bánh xe. Hai bánh xe ở giữa là 2 bánh chủ động, được điều khiển bởi hai động cơ DC. Một bánh xe phía trước và sau thân robot là 2 bánh thụ động.

Cấu trúc robot được thể hiện trong H. 1. Điểm G là trọng tâm robot, 2 động cơ được sắp xếp đồng trục.



H. 1 Cấu trúc robot di động

Hệ toạ độ tại điểm G $\{O_R X_R Y_R\}$ gắn trên thân robot được gọi là hệ toạ độ robot hoặc hệ toạ cục bộ vì hệ toạ độ này được dịch chuyển theo chuyển động của robot di động. Hệ toạ độ còn lại $\{OXY\}$ được gọi là hệ toạ độ quán tính hay hệ toạ độ cố định, được sử dụng khi làm việc trên vị trí của robot. Hai hệ toạ độ này lần lượt được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} q_R = x_r y_r \theta_r^T \\ q = x y \theta^T \end{cases} \quad (1)$$

Một ma trận biến đổi $Rot(\theta)$ được sử dụng để chuyển đổi giữa hệ toạ độ cố định và hệ toạ độ robot:

$$\dot{q}_R = Rot(\theta) \dot{q} \Rightarrow \dot{q} = Rot(\theta)^{-1} \dot{q}_R \quad (2)$$

Trong đó:

$$Rot(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 Mô hình động học

Động học của robot liên quan đến mối quan hệ giữa vị trí, vận tốc, gia tốc và các cấu trúc vật lý của nó. Bằng cách thay đổi vận tốc của hai bánh xe, quỹ đạo của robot có thể thay đổi. $\dot{\varphi}_R, \dot{\varphi}_L$ lần lượt là vận tốc quay của bên phải và bên trái. Ta có:

$$\begin{aligned} V_R &= r \dot{\varphi}_R \\ V_L &= r \dot{\varphi}_L \end{aligned} \quad (4)$$

V_R và V_L là vận tốc tuyến tính bánh xe phải và trái. Với bất kỳ trường hợp nào, v và ω có thể được tính như sau:

$$\begin{aligned} v &= \frac{(V_R + V_L)}{2} \\ \omega &= \frac{(V_R - V_L)}{2D} \end{aligned} \quad (5)$$

Từ (3) và (4), mối quan hệ vận tốc giữa hai toạ độ được biểu diễn như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(V_R + V_L)}{2} \cos \theta \\ \frac{(V_R + V_L)}{2} \sin \theta \\ \frac{(V_R - V_L)}{2D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

Mô hình động học thuận của robot có thể được miêu tả như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = S(q)V(t) \quad (7)$$

2.3 Mô hình động lực học

Phân tích động lực học của robot có thể được định nghĩa là kiểm tra mối quan hệ giữa độ lớn mô-men xoắn hoặc độ lớn lực tác dụng lên bánh xe bởi bộ truyền động, vị trí, vận tốc và gia tốc của robot theo thời gian. Sự khác biệt giữa mô hình động lực học và mô hình động học là mô hình động học chỉ xem xét chuyển động với các quan hệ hình học chi phối hệ thống mà không xem xét các lực tác động đến chuyển động.

Theo [14], mô hình động lực học tính được như sau:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (8)$$

q, \dot{q} và \ddot{q} lần lượt chỉ định các vector vị trí, vận tốc và gia tốc tương ứng. $M(q)$ là ma trận quán tính xác định dương đối xứng, $V(q, \dot{q})$ là ma trận hướng tâm và Coriolis, $G(q)$ là lực hấp dẫn vectơ, τ_d biểu thị các nhiễu lực học phi cấu trúc không được mô hình hóa, $B(q)$ là ma trận biến đổi đầu vào, τ là vectơ mô-men xoắn đầu vào, $A^T(q)$ là ma trận được liên kết với các ràng buộc và λ là vectơ của các lực ràng buộc. Bỏ qua lực hấp dẫn $G(q)$, ma sát của bánh xe được truyền vào hệ có sai số được xác định trong mô hình động học nên $F(q)$ bị bỏ qua, giá trị nhiễu được cộng vào tín hiệu điều khiển của cơ cấu chấp hành nên ta bỏ qua trong mô hình động. m là khối lượng và I biểu thị mô men quán tính của robot, ta có:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, G(q) = 0, F(q) = 0$$

$$B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ D & -D \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, A^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Phương trình động lực học của robot được viết lại như sau:

$$M(q)\ddot{q} = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (10)$$

Ma trận $S(q)$ được sử dụng để rút gọn. Ma trận $S(q)$ là ma trận động học tịnh tiến được sửa đổi liên quan đến khoảng cách giữa trọng tâm của robot và trục bánh xe, như đã thấy trong phương trình động học tịnh tiến:

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (11)$$

Ma trận gia tốc thu được bằng cách lấy đạo hàm thời gian phương trình (11) như sau:

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \quad (12)$$

Sử dụng phương trình (10) và (12), mô hình robot được sửa như sau:

$$M(q)S(q)\dot{\eta} + M(q)\dot{S}(q)\eta = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (13)$$

Nhân cả 2 vế cho ma trận biến đổi $S^T(q)$, ta có:

$$S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)M(q)\dot{S}(q)\eta = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)A^T(q)\lambda \quad (14)$$

Với $S^T(q)A^T(q) = 0$, phương trình (14) được viết lại dưới dạng:

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \quad (15)$$

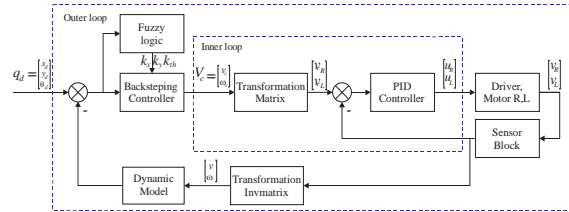
$$\text{Trong đó: } \begin{cases} \bar{M}(q) = S^T(q)M(q)S(q) = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \\ \bar{V}(q, \dot{q}) = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \bar{B}(q) = S^T(q)B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ D & -D \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

Phương trình động lực học của robot được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ D & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{rm} & \frac{1}{rm} \\ \frac{D}{rI} & \frac{-D}{rI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3. Thiết kế bộ điều khiển

Cấu trúc bộ điều khiển được đề xuất ở đây bao gồm 2 vòng điều khiển. Vòng lặp ngoài được thiết kế trên cơ sở động học của robot (kinematic controller) nhằm bám quỹ đạo đặt, bộ điều khiển này là sự kết hợp của bộ điều khiển Backstepping với khả năng chống lại các nhiễu tác động từ môi trường hoặc từ mô hình robot bằng Logic mờ để tự chỉnh định các tham số trong bộ điều khiển. Vòng lặp trong sử dụng bộ điều khiển PID để đảm bảo cho vận tốc dài và vận tốc góc của robot bám với giá trị điều khiển mong muốn. Cấu trúc của bộ điều khiển được thể hiện trên H. 2.



H. 2 Cấu trúc bộ điều khiển đề xuất

3.1 Bộ điều khiển Backstepping

Với $q = x \ y \ \theta^T$ và $q_R = x_r \ y_r \ \theta_r^T$ lần lượt là vị trí trong hệ tọa độ cố định và hệ tọa độ robot. Sự khác biệt giữa q và q_R cho các giá trị sai lệch về vị trí của robot trong hệ tọa độ chuẩn. Phương trình sai lệch bám vị trí của robot được chỉ ra **Error! Reference source not found.**:

$$e_q = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

Đạo hàm cả 2 vế ta có:

$$\dot{e}_q = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_r \cos \theta_e \\ -\omega x_e + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (36)$$

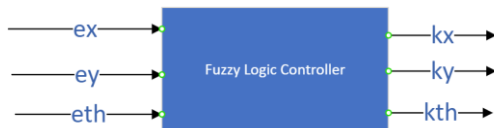
Dựa trên cách tiếp cận được phát triển trong **Error! Reference source not found.**, luật điều khiển động học được áp dụng như sau:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + K_x x_e \\ \omega_r + v_r (K_y y_e + K_\theta \sin \theta_e) \end{bmatrix} \quad (37)$$

K_x, K_y và K_θ là các giá trị dương. Thông thường, để thiết kế các tham số này đòi hỏi quá trình nhận dạng hệ thống với các thuật toán phức tạp. Ở đây nhóm tác giả đề xuất một bộ điều khiển mờ dựa trên cơ sở sai lệch vị trí của robot trong thực tế. Bộ điều khiển này có khả năng điều chỉnh tự động các tham số này một cách hiệu quả.

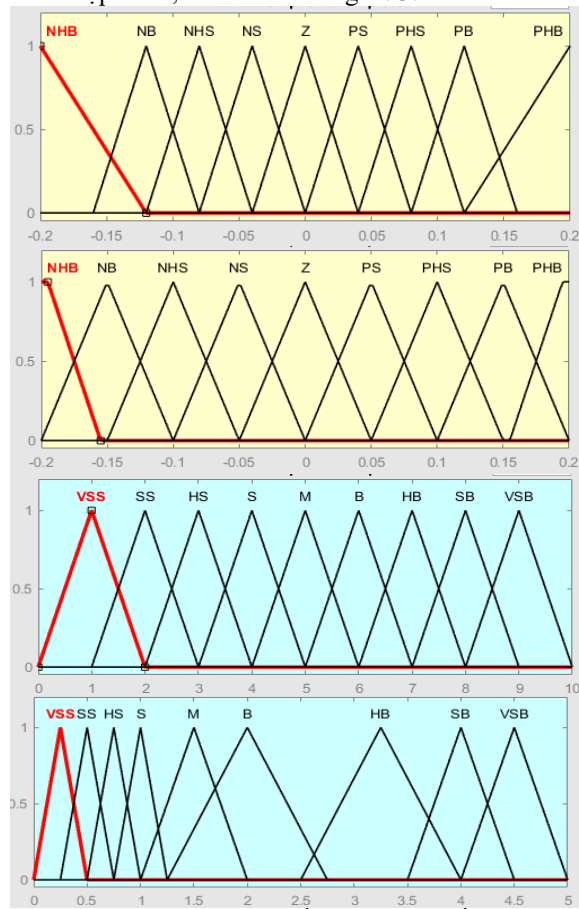
3.2 Logic mờ

Bộ điều khiển mờ dựa trên kinh nghiệm, dùng các luật ngôn ngữ IF- THEN để điều khiển đặc tính của robot. Ưu điểm của phương pháp này là tín hiệu điều khiển trơn. Đầu vào của bộ mờ hóa là các biến sai số vị trí và góc của robot di động so với quỹ đạo thiết kế, sau bộ giải mờ là vận tốc góc của bánh trái và vận tốc bánh phải robot. Các biến đầu vào/ ra sử dụng hàm tam giác để giảm thời gian tính toán mà vẫn đạt được độ chính xác cần thiết. Các luật hợp thành là phần khó nhất trong quá trình thiết kế, dựa trên kinh nghiệm về điều khiển và mô phỏng robot.



H. 3 Bộ điều khiển mờ

Các hàm thành viên tương ứng với đầu vào và xuất ra các tập mờ e , e' và K có trong H. 3.



H. 4 Hàm thành viên của đầu vào e , e' và đầu ra K

Đầu vào của các biến điều khiển luật 9 biến bao gồm: NHB (Negative High Big), NB (Negative Big), NHS (Negative High Small), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PHS (Positive High Small), PB (Positive Big), PHB (Positive High Big).

Đầu ra của luật gồm 9 biến là: VSS (Very Supper Small), SS (Supper Small), HS (High Small), S (Small), M (Middle), B (Big), HB (High Big), S (small), HB (High Big), SB (Supper Big), VSB (Very Supper Big).

Bảng luật mờ được xây dựng:

B. 1 Luật mờ cho K_x

kx	e								
	NHB	NB	NHS	NS	Z	PS	PHS	PB	PHB
NHB	HB	HB	HB	HB	HB	SB	SB	SB	VSB
NB	HB	HB	HB	HB	HB	SB	SB	SB	VSB
NHS	HB	HB	HB	HB	HB	SB	SB	SB	VSB
NS	B	B	B	B	B	HB	HB	HB	SB
Z	M	M	B	B	B	B	HB	HB	SB
PS	S	S	M	B	B	B	B	B	B
PHS	HS	HS	S	S	S	S	M	B	B
PB	VSS	SS	HS	S	M	M	M	B	B
PHB	VSS	SS	HS	S	M	M	M	B	B

B. 2 Luật mờ cho K_y

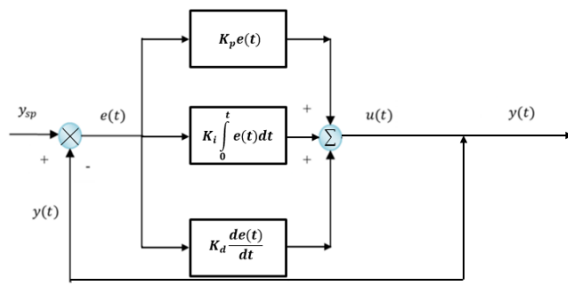
ky	e								
	NHB	NB	NHS	NS	Z	PS	PHS	PB	PHB
NHB	SB	HB	HB	M	S	S	HS	SS	VSS
NB	SB	HB	HB	M	S	S	HS	SS	VSS
NHS	VSB	SB	HB	B	M	S	S	HS	SS
NS	VSB	SB	HB	B	M	M	S	S	HS
Z	VSB	SB	HB	B	M	M	S	S	HS
PS	VSB	SB	HB	B	M	M	S	M	B
PHS	VSB	SB	HB	B	M	M	S	M	B
PB	VSB	SB	SB	B	M	M	M	M	B
PHB	VSB	SB	SB	B	M	M	M	M	B

B. 3 Luật mờ cho K_{th}

kth	e								
	NHB	NB	NHS	NS	Z	PS	PHS	PB	PHB
NHB	SB	HB	B	M	S	S	HS	SS	VSS
NB	SB	HB	HB	M	S	S	HS	SS	VSS
NHS	SB	HB	HB	M	S	S	HS	SS	VSS
NS	VSB	SB	HB	B	M	S	S	HS	SS
Z	VSB	SB	HB	B	M	M	S	S	SS
PS	VSB	SB	HB	B	M	M	S	S	HS
PHS	VSB	SB	HB	B	M	M	S	M	B
PB	VSB	SB	SB	B	M	M	M	M	B
PHB	VSB	SB	S	B	M	M	M	M	B

3.3 Bộ điều khiển PID

Phương pháp điều khiển vòng kín thông thường được điều khiển bằng bộ điều khiển PID hay còn gọi là giải thuật PID. PID là tên gọi của bộ điều khiển gồm 3 thành phần Proportional (P) là tỉ lệ, Integral (I) là tích phân và Derivative (D) là vi phân. Bộ điều khiển PID hiệu chỉnh sai số giữa giá trị đo được và giá trị mong muốn bằng cách tính toán ra một tín hiệu điều khiển để giữ cho sai lệch ở mức nhỏ nhất có thể được. Bộ điều khiển này có 3 tham số K_p , K_i và K_d để điều chỉnh sai số của bộ điều khiển.

**H. 5** Sơ đồ khối bộ điều khiển PID

Phương trình bộ điều khiển PID được sử dụng:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Sai lệch $e(t)$ tại thời điểm t : độ lệch giữa giá trị mong muốn và giá trị đo được.

$$e(t) = y(t) - y_{sp}$$

Trong đó:

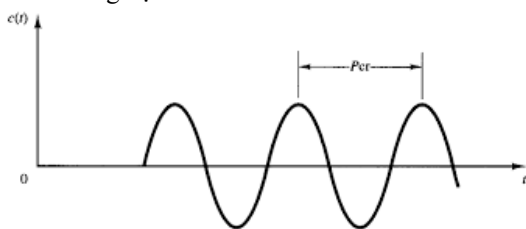
- + y_{sp} : giá trị mong muốn.
- + $y(t)$: giá trị đo được tại thời điểm t .

Theo H. 2 bộ điều khiển PID được sử dụng để điều chỉnh cho vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của robot bám với giá trị mong muốn dựa vào độ sai lệch. Từ đó điều khiển 2 động cơ gắn với 2 bánh chủ động của robot. Độ sai lệch được tính toán trong bộ điều khiển PID là độ lệch giữa vận tốc đặt với vận tốc thực tế.

Có nhiều phương pháp xác định tham số của bộ điều khiển PID [15],[16], trong bài báo này nhóm tác giả sử dụng phương pháp Ziegler-Nichols thứ 2.

Các bước xác định thông số PID cho hệ thống theo phương pháp Ziegler-Nichols thứ 2:

- + Đầu tiên đặt $K_i = 0$ và $K_d = 0$.
- + Chỉ sử dụng tác động khuếch đại, tăng K_p từ 0 tới một giá trị tới hạn K_{cr} , tại đó đầu ra của hệ thống có dạng dao động điều hoà.
- + Xác định K_p và chu kỳ dao động P_{cr} bằng thực nghiệm.

**H. 6** Chu kỳ dao động P_{cr}

Xác định các tham số K_p , K_i và K_d của bộ điều khiển theo bảng sau:

B. 4 Phương pháp Ziegler-Nichols

Type of Controller	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_{cr}$	0	0
PI	$0.45K_{cr}$	$0.85P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Tính toán K_i và K_d của hệ thống dựa vào P_{cr} từ đó

tìm được tham số của bộ điều khiển PID. Sau quá trình thực nghiệm, các giá trị của bộ điều khiển tìm được như sau: $K_p = 0.02$, $K_i = 0.00015$ và $K_d = 0.01$.

4. Kết quả thực nghiệm

Trong phần này, kết quả thực nghiệm được trình bày để kiểm tra tính hiệu quả và độ chính xác của việc kết hợp các bộ điều khiển.

Các thông số thực nghiệm được xác định trong B. 5.

B. 5 Thông số thực nghiệm

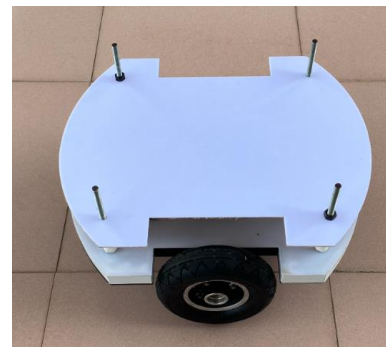
Thông số Robot	$L = 0.37\text{m}$, $r = 0.1\text{m}$
Thông số bộ PID	$K_p = 0.002$, $K_i = 0.00015$, $K_d = 0.01$

Vị trí ban đầu của robot được đặt tại tọa độ $(0, 0)$; Quỹ đạo đặt là hình tròn được biểu diễn bởi phương trình:

$$x_d = R \cos(\omega t)$$

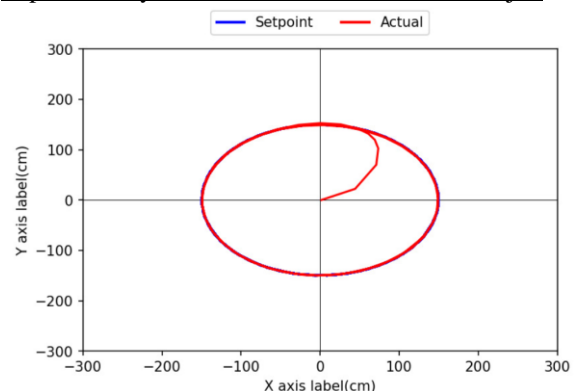
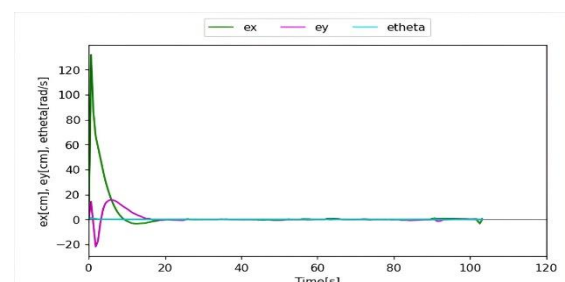
$$y_d = R \sin(\omega t)$$

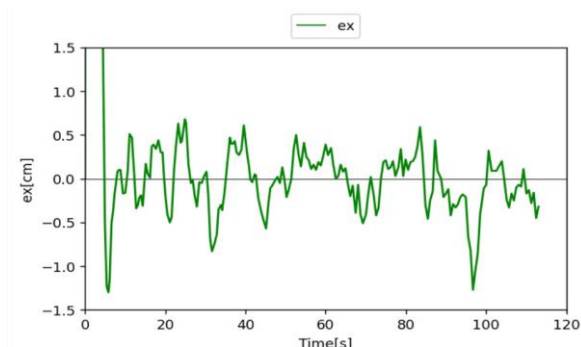
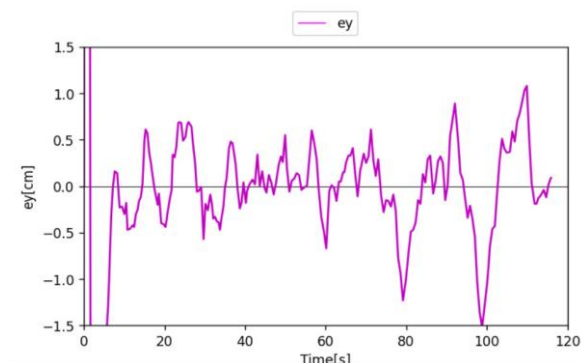
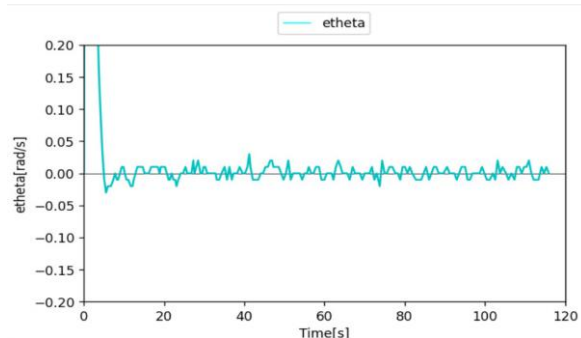
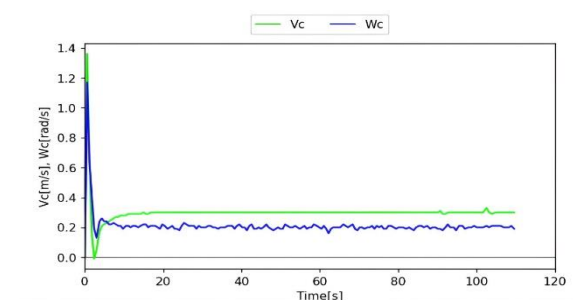
Với bán kính quỹ đạo $R = 150\text{ cm}$ và $\omega = 0.2\text{ rad/s}$

**H. 7** Mô hình robot thực nghiệm

Link video thực nghiệm:

<https://www.youtube.com/watch?v=6Xz11GfAjuo>

**H. 8** Quỹ đạo chuyển động thực tế của robot**H. 9** Sai lệch theo trục x , y và góc lái θ

H. 10 Đồ thị sai lệch $ex = x_d - x$ H. 11 Đồ thị sai lệch $ey = y_d - y$ H. 12 Đồ thị sai lệch góc lái: $etheta = theta_d - theta$ 

H. 13 Tín hiệu điều khiển

Sai lệch theo các trục x, y và góc lái $theta$ thể hiện trên hình H. 9, H. 10, H. 11, H. 12 cho thấy robot đã bám theo quỹ đạo đặt với khoảng sai số chấp nhận được với tín hiệu điều khiển là vận tốc dài và vận tốc góc đặt được sau khối kinematic control.

Trong thực tế, khi chịu tác động bởi ngoại lực làm lệch quỹ đạo chuyển động của robot (link video), bộ điều khiển đề xuất đã nhanh chóng giúp robot bám lại quỹ đạo đặt ban đầu.

5. Kết luận

Bằng cách kết hợp các bộ điều khiển như PID, Backstepping và Fuzzy logic vào ứng dụng thực nghiệm đã chứng minh rằng bộ điều khiển đề xuất hoạt động ổn định và đáng tin cậy trong bài toán điều khiển bám theo quỹ đạo đặt. Bộ điều khiển logic mờ đã giúp cải thiện khả năng thích ứng của hệ thống với biến động của môi trường. Tuy nhiên, nhận thức rõ ràng về tiềm năng của nghiên cứu, nhóm đề xuất hướng phát triển tiếp theo có thể thực nghiệm thêm một số bộ điều khiển khác để kiểm chứng, so sánh tính hiệu quả, sự ổn định của hệ thống.

6. Cảm ơn

Bài báo được tài trợ bởi Đề tài cấp Viện Hàn lâm KHCN Việt Nam “Nghiên cứu, hoàn thiện thiết kế và chế tạo mẫu robot dạng người thông minh IVASTBot ứng dụng trong giao tiếp lễ tân văn phòng”, mã số CT0000.01/24-25.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. V. Steen, M. Reyhanoglu, "Trajectory Tracking Control of a Rolling Disk on a Smooth Manifold", The 12th Asian Control Conference (ASCC) Kitakyusyu International Conference Center, Japan, 43-48, 2019.
- [2] D. Ben Halima Abid, N. Youssfi Allagui, and N. Derbel, "Navigation and trajectory tracking of mobile robot based on kinematic PI controller", The 17th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering (STA'17), Monastir, Tunisia, 2017.
- [3] T. Obeidi, C. Larbes, A. Ilinca, G. Filiz, and T. Kebir, "Fuzzy logic based maximum power point tracking for a solar electric vehicle", Acta polytechnica hungaria, 15(7), 133-156, 2018.
- [4] S. Sahloul, D. Ben Halima, C. Rekik, "Comparative study of hybrid Fuzzy logic methods for mobile robot navigation in unknown environments", The 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA'19), Sousse, Tunisia, 170-175, 2019.
- [5] I. Hassani, I. Maalej and C. Rekik, "Control points searching algorithm for autonomous mobile robot navigation with obstacle avoidance", The 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA'19), Sousse, Tunisia, 158-163, 2019.
- [6] I. Hassani, I. Maalej and C. Rekik, "Robot path planning with avoiding obstacles using free segments and turning points algorithms", Mathematical problem in Engineering, 2018(6), 1-13, 2018.
- [7] H. S. Phuong, N. M. Tien, N. D. Tan, M. T. Anh and D. D. Tu, "Proposal of a Fault-tolerant controller for wheeled mobile robots with faulty actuators," 2023 12th International Conference on

- Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hanoi, Vietnam, 2023, pp. 507-512
- [8] Zhang, L., Liu, L., & Zhang, S. (2020). Design, implementation, and validation of robust fractional-order PD controller for wheeled mobile robot trajectory tracking. *Complexity*, Hindawi, Complexity, 2020(4), 1-12.
- [9] Y. Koubaa, M. Boukattaya, and T. Damak, "Intelligent control for nonholonomic mobile robot including actuator dynamics," *International Multiconference on Systems, Signals, and Devices (SSD18)*, Hammamet, Tunisia, 1012-1016, 2018.
- [10] A. Mino, K. Uchiyama and K. Masuda, "Backstepping Control for Satellite Attitude Control Using Spherical Control Moment Gyro", 2019 SICE International Symposium on Control Systems(SICEISCS),Japan,DOI:10.23919/SICEISCS.2019.8758769.
- [11] W. G. Wu, H. T. Chen, and Y. J. Wang, "Global trajectory tracking control of mobile robots" *Acta Automatica Sinica*, vol. 27, pp. 326-331, 2001.
- [12] G. Zidani, S. Drid, L. Chrifi-Alaoui, A. Benmakhlouf, and S. Chaouch, "Backstepping controller for a wheeled mobile robot" in *Proc. 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 2015, pp. 443-448
- [13] Y. Huang, L. Chong, Z. Li, W. Gao, H. Lu, L. Wei, *Backstepping sliding mode control for robot manipulator via nonlinear disturbance observer*, *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference*, Guangzhou, China, 3220-3224, 2019.
- [14] Mustafa Ayyıldız & Umut Tilki (2023) Adaptive sliding mode based fault tolerant control of wheeled mobile robots, *Automatika*, 64:3, 467-483, DOI: 10.1080/00051144.2023.2190866
- [15] Huang, M., Tian, M., Liu, Y. et al, "Parameter optimization of PID controller for water and fertilizer control system based on partial attraction adaptive firefly algorithm", *Sci Rep* 12,12182(2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16425-7>.
- [16] Hekimoglu, B, "Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm", *IEEE Access* 7, 38100–38114 (2019).



Hồ Sỹ Phương, sinh năm 1986, nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa của Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2013. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường ĐH Vinh. Từ năm 2023 là nghiên cứu sinh tại Viện Hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam, hướng nghiên cứu chính: Robotics, điều khiển thích nghi, điều khiển mờ và mạng nơ ron.



Trần Phương Nam, sinh năm 2003, sinh viên ngành Kỹ thuật Điều khiển và tự động hóa, viện Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu: Robotic, điều khiển thích nghi, mạng nơ ron.



Mai Thế Anh, sinh năm 1987, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Điều khiển học kỹ thuật và lý thuyết thông tin của Trường ĐH năng lượng Moscow năm 2018. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: robotics, mạng neural, điều khiển mờ, mô hình hóa và mô phỏng hệ thống điều khiển tự động.



Lê Văn Chương, sinh năm 1985, bảo vệ luận án Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa tại Viện Khoa học và công nghệ quân sự năm 2023. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: các phương pháp phân tích và tổng hợp các hệ thống điều khiển tự động.



Dương Đình Tú, sinh năm 1986, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Điều khiển học kỹ thuật và lý thuyết thông tin của Trường ĐH giao thông Moscow năm 2018. Hiện tại là giảng viên Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu chính: thị giác máy tính trong kỹ thuật điều khiển, robotics, neural networks.



Lê Thị Thu Uyên, sinh năm 2003, sinh viên ngành Kỹ thuật Điều khiển và tự động hóa, viện Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu: Robotic, điều khiển thích nghi.



Phan Văn Vỹ, sinh năm 2003, sinh viên ngành Kỹ thuật Điều khiển và tự động hóa, viện Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Vinh. Hướng nghiên cứu: Robotic, điều khiển logic mờ.